





Columbitisation du pyrochlore par hydrothermalisme et formation de halite dans la  
carbonatite de Saint-Honoré, Saguenay, Québec (Canada)

Par

Jonathan Tremblay

Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de  
Maître (M.Sc.) en géologie et génie géologique (1687)

Québec, Canada

© Jonathan Tremblay, 2017

## RÉSUMÉ

Les carbonatites sont reconnues pour leur pétrogenèse énigmatique, mais aussi pour leurs minéralisations économiques en P, Nb, Ta et les éléments de terres rares. La carbonatite de Saint-Honoré est l'une des trois exploitations majeures de niobium, mais la seule à l'extraire d'une carbonatite cristalline, c'est-à-dire non latéritisée. Plusieurs minéraux porteurs de Nb ont été identifiés dans la carbonatite de Saint-Honoré, mais seulement deux minéraux sont abondants: le fluorcalciopyrochlore  $[(Ca,Na)_2(Nb,Ti)_2O_6(O,OH,F)]$  (pcl) et la columbite-(Fe)  $[(Fe,Mn)(Nb,Ti)_2O_6]$  (clb). La proportion de columbite-(Fe) est moins abondante dans la partie supérieure de la carbonatite, mais augmente graduellement en profondeur et vers le nord. L'exploitation se faisant de plus en plus profondément, sa proportion est désormais de 35% et sa présence influence la récupération du Nb lors du traitement métallurgique. De plus, deux modèles s'affrontent pour la genèse de la columbite-(Fe) : magmatique et hydrothermale. L'étude des minéraux a montré que la columbite-(Fe) est un produit d'altération du pyrochlore. L'altération se caractérise par un lessivage des éléments du site A (p.ex. Ca, Sr, Na, et ETR) et du fluor du site Y du pyrochlore. Le Fe et le Mn remplacent ainsi les vides laissés au site A. La pétrographie au microscope polarisant et à la cathodoluminescence montre effectivement des inclusions de calcite et de fluorite à l'intérieur de la columbite-(Fe), suggérant que les éléments lessivés sont rapidement recristallisés. Le microscope électronique à balayage a permis d'identifier des grains de pyrochlore en processus d'altération, confirmant ainsi la columbitisation. La stœchiométrie du site A des pyrochlores montre une altération d'origine hydrothermale. Les données en LA-ICP-MS révèlent un enrichissement en Cl et en ETR lourdes dans les columbites-(Fe) appuyant l'idée d'un fluide hydrothermal riche en ETR lourdes. De plus, l'enrichissement en Cl pourrait expliquer la présence de chlorures dans la carbonatite. Il est notamment suggéré que le Na lessivé du pyrochlore, couplé au Cl provenant du fluide hydrothermal, contribue à la formation de halite. En effet, des grains de halite de moins de 10  $\mu m$  ont été observés dans les cavités de pyrochlores faiblement altérés. Autrement, la halite s'observe en remplissage de fractures jusqu'à quelques centimètres d'épais par endroits. La libération du sodium contribue probablement à la fénitisation des encaissants. Finalement, les relations minéralogiques ont permis de cerner une association intrinsèque entre la columbite-(Fe) et une apatite orangée. Les observations supposent que cette apatite est d'origine hydrothermale. Elle pourrait ainsi servir de traceur géologique pour différencier les lentilles dominées par le pyrochlore ou la columbite-(Fe).

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	i
TABLE DES MATIÈRES .....	ii
AVANT-PROPOS .....	vi
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE I.....	6
Abstract.....	9
1. Introduction .....	10
1.1 Geological setting.....	13
1.2 Mining overview .....	15
2. Methods .....	16
2.1 Sample collection and preparation .....	16
2.2 Sample analysis.....	17
3. Results .....	18
3.1 Petrography of the niobium-bearing units.....	18
3.1.1 Dolomitic rocks .....	19
3.1.2 Enclosed calcitic units.....	20
3.2 Nb mineralization.....	20
3.3 Fluorcalciopyrochlore .....	21
3.4 Columbite-(Fe).....	21
3.5 Trace elements in Nb mineralization .....	22
3.6 Crystallization of halite .....	23
4. Discussion.....	23
4.1 Petrology of the Nb-bearing units and mineralization .....	24
4.2 Alteration of pyrochlore .....	26
4.3 Origin of alteration .....	29
4.4 Origin of halite .....	30
5. Conclusion .....	33
Acknowledgments .....	34

References.....	36
CHAPITRE II .....	56
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	59
RÉFÉRENCES .....	63
ANNEXE 1 .....	66
ANNEXE 2 .....	67
ANNEXE 3 .....	68
ANNEXE 4.....	69
ANNEXE 5 .....	71
ANNEXE 6.....	75
ANNEXE 7 .....	77
ANNEXE 8.....	175

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

CL : cathodoluminescence

Clb : columbite-(Fe)

ETR : éléments de terres rares

LA-ICP-MS : *Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry*

MEB : microscope électronique à balayage

Pcl : pyrochlore

XRF : *X-ray fluorescence* (spectrométrie de fluorescence des rayons X)

## REMERCIEMENTS

Je me dois de remercier en premier lieu l'instigateur et directeur du projet, M. Paul Bédard, pour sa disponibilité, son soutien académique et moral, ses brillantes idées et ses hypothèses farfelues qui te poussent à te questionner davantage. Mes remerciements vont ensuite à mon codirecteur et partenaire industriel, M. Guillaume Matton, qui nous permettait d'obtenir des informations éclairées sur la carbonatite lors de questionnements. Sa collaboration m'a grandement été utile lors de ma recherche et je souligne sa participation dans la révision de documents. Je remercie aussi Alexis Gauthier-Ross et Louis-Mathieu Tremblay (Niobec) pour le partage de connaissances et leur patience lors des visites à la mine. Je me dois aussi de remercier les auxiliaires d'enseignement et de recherche de l'UQAC, soit Denis Côté, Dany Savard, Maryse Doucet et David Noël qui font un travail hors pair.

Il est impératif de remercier mes amis, tous ceux avec qui j'entretiens une relation depuis plusieurs années ou ceux que je côtoie depuis mes études universitaires. Merci à ceux avec qui j'ai échangé et discuté de mon projet. Notre amitié va au-delà du cadre universitaire et j'espère pouvoir travailler avec vous prochainement.

Merci à ma famille, à mes beaux-parents, mais plus précisément mes parents pour leurs encouragements et leur appui. Un chaleureux remerciement va à ma femme Christine qui ne comprenait rien de mon projet et qui définit l'intérêt d'une roche par sa couleur. J'apprécie toutefois ton intérêt à mes avancées et tes encouragements soutenus.

Je terminerai donc en réitérant mes remerciements aux gens ayant contribué au projet de quelque façon, mes amis, ma famille, mon épouse.

Je dédie cet ouvrage à Simon, mon grand ami, parti trop tôt.

## AVANT-PROPOS

Ce présent mémoire est présenté sous la forme d'un article scientifique. De cette manière, le corps du texte correspond à l'article soumis à *Ore Geology Reviews* selon leurs barèmes éditoriaux. Pour des raisons d'uniformité universelle, ledit article est rédigé en anglais. Le mémoire possède toutefois une enveloppe descriptive rédigée en français incluant le résumé de l'article, une introduction et une conclusion au projet de recherche. Il y a aussi quelques annexes permettant au lecteur de mieux comprendre la démarche scientifique tout au long du projet.

Le projet m'a tout de suite interpellé, et ce sur deux volets. D'une part, le projet s'est effectué en partenariat avec une compagnie régionale et les enjeux ont des répercussions sur la pérennité des opérations. D'une autre part, les carbonatites sont des roches très étudiées, mais encore si mystérieuses. Il est gratifiant d'avoir contribué à mieux comprendre plusieurs aspects de la carbonatite telle que la présence de columbite-(Fe) et de halite dans l'enveloppe minéralisée et la relation intrinsèque avec l'apatite orangée. Il reste néanmoins beaucoup de travail à faire, mais j'espère que d'autres auront le désir de suivre les pistes que ce projet propose.



## INTRODUCTION

Les carbonatites suscitent un fort intérêt pour leur pétrogenèse complexe, mais aussi pour leurs minéralisations en P, Ta, Nb et en éléments de terres rares (ETR). Les carbonatites de Mountain Pass (É.-U.) et de Bayan Obo (Chine) sont exploitées pour les ETR sous forme cristalline et résiduelle respectivement. La carbonatite de Mountain Pass, longtemps joueur majeur dans la production mondiale, possède 20 millions de tonnes à 8,9% oxydes de terres rares. Bayan Obo, gisement d'origine hydrothermale (Simandl 2014) possède des réserves de plus de 600 millions de tonnes de minerai à 5% d'oxydes de terres rares (Chao et al. 1992). Ces ressources témoignent de la richesse contenue dans les carbonatites. Outre les ETR, les carbonatites sont aussi la source primaire de niobium. Seulement trois carbonatites sont exploitées pour satisfaire la demande mondiale. Deux se situent au Brésil (Araxà et Catalão-II) et exploitent des dépôts supergènes à la hauteur de 90% de la production annuelle tandis que celle au Canada (Saint-Honoré) procure le 10% restant grâce à un dépôt non altéré (USGS 2017). Araxà possède plus de 800 millions de tonnes (Mt) à 2,5% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (CBMM 2013). Catalão-II, maintenant propriété de China Molybdenum Co. Ltd depuis avril 2016 possède 22 Mt à 1,07% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Marino 1989). Les réserves seront actualisées prochainement considérant les nouveaux calculs effectués sur la roche fraîche en profondeur. La carbonatite de Saint-Honoré détient des réserves de 400 Mt à 0,42% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. (Iamgold 2012). Les teneurs sont plus basses étant donné que la minéralisation se retrouve sous forme primaire; aucun processus d'enrichissement superficiel n'a modifié le complexe. De plus, le gisement est ouvert en profondeur.

Les réserves des principaux gisements de Nb et d'ETR témoignent de la pertinence économique des carbonatites. Cela dit, moins d'un pour cent des carbonatites sont économiquement viables pour l'exploitation du Nb. La demande annuelle en Nb ne cesse de croître (Roskill.com 2016) par le développement des pays émergents et le développement de nouvelles technologies telles que les supraconducteurs. L'intérêt d'étudier les carbonatites provient du fait que la plupart contiennent des valeurs disséminées en Nb, mais que seulement quelques-unes ont subi des processus génétiques responsables de la concentration du Nb. La finalité est de mieux comprendre la genèse des carbonatites et d'élaborer de nouvelles stratégies d'exploration pour le Nb, les ETR, le Ta ou tout autre élément économiquement viable (p. ex. Ba, Sr, P, Cu, etc.).

Les principales carbonatites exploitées ou valorisées pour l'exploitation en Nb ont subi des processus supergènes et la minéralisation se retrouve sous forme de latérites. Dans les portions moins altérées, ces carbonatites montrent un point commun aux carbonatites exploitant le Nb sous forme cristalline; le pyrochlore est le minéral dominant. En effet, les essais expérimentaux ont montré qu'un magma riche en F engendre une cristallisation préférentielle du pyrochlore à tout autre minéral porteur de Nb (Mitchell and Kjarsgaard 2004). Ceci est en accord avec les hautes teneurs en fluor (~4%) des apatites du complexe de Saint-Honoré. La forte association apatite-pyrochlore observée dans les carbonatites économiques est expliquée par le transport du Nb dans des complexes riches en P et en F (Hogarth et al. 2000; Knudsen 1989). Lors de la cristallisation en fluorapatite, le solidus est à la baisse, ce qui modifie les paramètres et force la précipitation du pyrochlore (Jago and Gittins 1991). Les éléments traces dans le pyrochlores corroborent ces observations, notamment avec les concentrations proportionnelles en F et en ETR légères. Ceci

supporte l'hypothèse voulant que le pyrochlore ait cristallisé conjointement avec l'apatite, car nul autre minéral ne montre des teneurs significatives en ces éléments, outre les minéraux de terres rares légères (p. ex. monazite) auxquels leur origine a été démontrée comme étant hydrothermale (Néron et al. 2015).

Le pyrochlore est en effet un minéral clé dans les exploitations en Nb. Plusieurs autres minéraux possèdent dans leur structure du Nb, mais aucun autre n'est assez abondant pour une exploitation économique. Le pyrochlore est un minéral octaédrique de couleur brunâtre à verdâtre ou rouge. Puisqu'il se forme en début de cristallisation, il est généralement idiomorphe. Une zonation est aussi possible et permet de mieux comprendre la genèse des pyrochlores (Hogarth et al. 2000).

Quoique le pyrochlore soit en équilibre avec les carbonates, il est peu réfractaire à l'altération. Il est facilement altéré en columbite  $[(\text{Fe},\text{Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6]$  (Lumpkin and Ewing 1995). La columbite est un minéral d'origine magmatique commun dans les pegmatites. Toutefois, sa présence dans les carbonatites est inhabituelle et encore incomprise, particulièrement sur ses processus de formation. La columbite a été décrite comme un minéral magmatique dans certaines carbonatites, notamment dans une rauhaugite à apatite dans la carbonatite de Fir, en Colombie-Britannique (Canada) et dans les carbonatites de la région de Vipeto, près de Fen, en Norvège (Mariano 1989). Par contre, certains auteurs estiment que la columbite est un minéral généralement d'altération (Nasraoui and Bilal 2000; Wall et al. 1996; Zurevinski and Mitchell 2004), créant ainsi un débat sur les processus de formation de la columbite. De ce fait, la columbite est présente dans la carbonatite de Saint-Honoré et sa présence augmente en profondeur passant d'une phase mineure dans les niveaux supérieurs à plus de 30% au niveau 2100'

(~650m). Connaître et comprendre son origine a des incidences sur la compréhension des carbonatites, mais aussi sur la récupération du Nb lors du traitement.

La carbonatite de Saint-Honoré est un site idéal pour l'étude des minéralisations en Nb puisqu'elle offre un accès en 3D souterrain sur plus de 700m de profondeur. De plus, la carbonatite n'est pas affectée par l'altération superficielle au-delà de 120m et est dépourvue de métamorphisme et de déformation. Les textures magmatiques sont donc bien conservées. Le but du projet était de caractériser les minéraux porteurs de Nb et de cerner un traceur pétrographique afin de différencier les zones porteuses de pyrochlore et de columbite dans le gisement afin de bonifier le traitement de minerai. Deux forages au niveau 1600' (~490m) ont été sélectionnés afin de parcourir l'entièreté de la zone économique en Nb, majoritairement composée du faciès dolomitique (Fig. A), mais recoupée par diverses unités. Le premier forage vise le nord et est d'une longueur de 235m et est incliné à 6° vers le bas. L'autre est vers le sud, incliné à 31° vers le bas et fait 115m. Soixante-treize (73) lames minces polies ont été produites à partir de ces deux forages. Les principaux outils sollicités sont le microscope polarisant, la cathodoluminescence et le microscope électronique à balayage pour l'aspect pétrographique et la microsonde et le LA-ICP-MS pour la géochimie. L'étude a vite démontré une augmentation irrégulière en columbite. Il a donc été question de décrire ces deux principaux minéraux, de comprendre le lien pétrogénétique qui les unie et d'identifier un traceur pétrographique ou géochimique pour différencier les deux minéraux lors de la description de carottes ou l'analyse système roche totale. La figure B démontre sommairement la portée de la recherche, soit la columbitisation et la formation

de halite. La question de la présence d'halite dans les carbonatites a aussi été soulevée lors de l'analyse de la columbite par son enrichissement anormal en Cl.

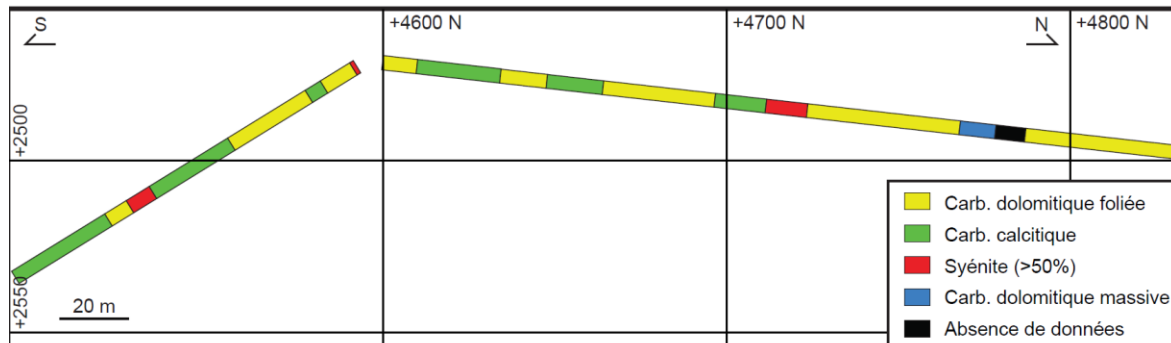


Figure A: Schématisation des unités pétrographiques le long des deux forages. Celui de gauche pointe vers le sud, mesure 115m et est incliné de 31°. Celui de droite pointe le nord, mesure 235m et est incliné de 6°. L'unité dolomitique est recoupée maintes fois.

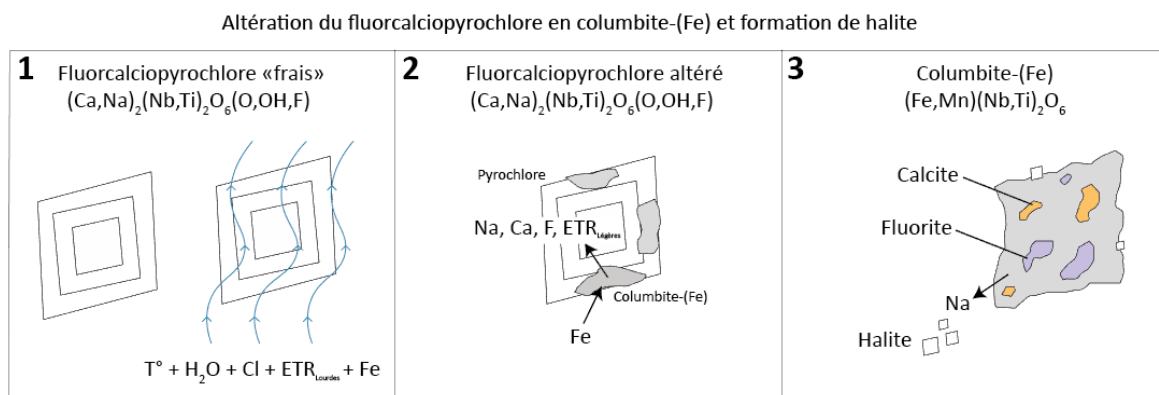


Figure B: Étapes sommaires de la columbitisation et de la formation de halite. **(1)** le fluide hydrothermal déséquilibre les pyrochlores non altérés, dits « frais »; **(2)** le pyrochlore s'altère en columbite-(Fe), lessivant ainsi ses éléments mobiles; **(3)** le pyrochlore est entièrement altéré en columbite-(Fe) et des inclusions de calcite et de fluorite, vestiges du lessivage, sont piégées à l'intérieur. Le Na, lessivé en premier, est expulsé et produit de la halite au contact du Cl.

## CHAPITRE I

Columbitisation par hydrothermalisme du fluorcalciopyrochlore dans le complexe alcalin de Saint-Honoré, Québec (Canada) : de nouvelles pistes sur la présence de halite dans les carbonatites

### **Titre en anglais du manuscrit soumis :**

Columbitization of fluorcalciopyrochlore by hydrothermalism at the Saint-Honoré alkaline complex, Québec (Canada): new insights on halite in carbonatites

### **Auteurs :**

Jonathan Tremblay (UQAC), L. Paul Bédard (UQAC) et Guillaume Matton (Niobec)

### **Journal :**

*Ore Geology Reviews*

## Résumé en français :

Le niobium dans les carbonatites se retrouve principalement dans le fluorcalciopyrochlore et la columbite-(Fe). Étudier ses processus de mise en place est impératif afin de mieux comprendre l'évolution des carbonatites. La carbonatite de Saint-Honoré offre une opportunité sans pareil pour l'étude de la minéralisation, car elle n'est pas affectée par la déformation, le métamorphisme et l'altération supergène. La columbite-(Fe) semble être d'origine magmatique dans plusieurs carbonatites, notamment celles de Fir (Colombie-Britannique, Canada) et celle de Fen (Norvège). Elle est aussi reconnue comme étant un minéral d'altération du pyrochlore (columbitisation) et cette altération est caractérisée par le lessivage des cations du site A et du fluor du site Y. Le Fe et le Mn remplacent alors une portion des sites libres laissés par le lessivage. Le Ca et le F lessivés cristallisent sous forme de calcite et de fluorite à l'intérieur des grains de pyrochlore. Le calcul des cations et des sites libres contenus dans les pyrochlores frais et altérés montrent que l'altération est d'origine hydrothermale. De plus, la carbonatite de Saint-Honoré contient de fortes teneurs en halite. Longtemps inexpliquée, des grains de halite ont été retrouvés dans les pyrochlores altérés. Le Na nécessaire provient de l'altération du pyrochlore tandis que le Cl est issu du fluide hydrothermal. En effet, la columbite-(Fe) montre des enrichissements en Cl, un argument favorable à l'hydrothermalisme. Un enrichissement en ETR lourdes est aussi noté. Cet enrichissement en terres rares lourdes permet de tracer l'hydrothermalisme, car une apatite orangée microcristalline est observée en périphérie de la columbite-(Fe) et elle contient elle aussi des teneurs considérables en ETR lourdes. Il est suggéré que le Cl augmente la solubilité des terres rares. Il est aussi possible que le Na lessivé du pyrochlore contribue à la fénitisation des encaissants.

Contribution des auteurs :

Jonathan Tremblay

- Échantillonnage de carottes;
- Analyse pétrographique au microscope polarisant et à la cathodoluminescence;
- Analyse géochimique au MEB, microsonde,  $\mu$ XRF et LA-ICP-MS;
- Rédaction du mémoire.

L. Paul Bédard

- Direction du projet;
- Encadrement de l'étudiant;
- Aide à la rédaction du mémoire;
- Correction du mémoire.

Guillaume Matton

- Aide à l'échantillonnage;
- Avis externe;
- Discussions scientifiques;
- Correction de l'article.



# **Columbitization of fluorcalciopyrochlore by hydrothermalism at the Saint-Honoré alkaline complex, Québec (Canada): new insights on halite in carbonatites**

**Jonathan Tremblay<sup>1,a</sup>, L Paul Bédard<sup>1</sup>, Guillaume Matton<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Sciences de la Terre, Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), Chicoutimi, Québec (Canada), G7H 2B1*

<sup>2</sup> *Niobec Inc., Saint-Honoré, Québec (Canada), G0V 1L0*

<sup>a</sup> *Corresponding author: [Jonathan.tremblay11@uqac.ca](mailto:Jonathan.tremblay11@uqac.ca)*

For submission to Ore Geology Reviews.

## **Abstract**

Niobium in carbonatite is mainly hosted in fluorcalciopyrochlore and columbite-(Fe). Niobium petrogenesis is useful for understanding the processes related to Nb mineralization and carbonatite evolution. The Saint-Honoré, Quebec, alkaline complex offers a rare opportunity for studying these processes as the complex is not affected by deformation, metamorphism or weathering. Columbite-(Fe) is shown to be an alteration product of fluorcalciopyrochlore (columbitization). Columbitization is characterized by the leaching of Na and F from the A- and Y-sites of the pyrochlore crystal structure. As alteration increases, Fe and Mn are slowly introduced while Ca is simultaneously leached. Leached Ca and F then crystallize as inclusions of calcite and fluorite within the columbite-(Fe). A-site cations and vacancies in the crystal structure of fresh and altered pyrochlores demonstrate that pyrochlore alteration is hydrothermal in origin. Moreover, halite is a ubiquitous mineral in the Saint-Honoré alkaline complex. Petrographic evidence shows that halite forms in weakly altered pyrochlores, indicating a secondary

origin. As alteration increases, halite is expelled by the hydrothermal fluid and is carried farther into the complex, filling fractures throughout the carbonatite. The hydrothermal hypothesis is strengthened by significant enrichments in Cl and HREEs in columbite-(Fe). Chlorine is most likely introduced by a hydrothermal fluid that increases the solubility of REEs. A HREE rim is observed around magmatic apatite associated with fluorcalciopyrochlore and columbite-(Fe), suggesting a post-magmatic event related to hydrothermal activity. The Na released from fluorcalciopyrochlore is a contributor to the sodic fenitization process associated with the carbonatite.

## **Keywords**

Pyrochlore; Columbite-(Fe); Halite; Niobium; Carbonatite; Saint-Honoré

## **1. Introduction**

Carbonatites are important rocks for understanding the Earth's evolution as they provide a window into the mantle and its dynamics. As such, they have been abundantly studied (Chakhmouradian et al., 2015; Decrée et al., 2015; Le Bas, 1981; Mitchell, 2015; Wyllie, 1966; among many others). However, the crustal evolution of carbonatites, either by crystal fractionation, hydrothermalism, carbothermalism or weathering can obliterate or modify much of the initial information recorded by these rocks. Thus, an understanding of the evolution of carbonatites is essential to better constrain any interpretations of their formation. Moreover, carbonatites are important economic rocks as they host strategic metals such as rare earth elements (REE), niobium (Mariano, 1989; Wall et al., 1999) and, in some cases, base metals (e.g. Cu; Heinrich, 1966). A rapidly increasing demand for Nb (Roskill, 2017) in emerging countries due to the building of pipelines and the

upgrading of equipment, such as through the addition of superconducting magnets and alloys (Mackay and Simandl, 2014), requires a better understanding of the mineralization processes within carbonatites to develop avenues of possible exploration. The petrography and chemistry of columbite and pyrochlore are often key for understanding the genesis of Nb mineralization.

Within carbonatites, minerals from the pyrochlore group host the Nb mineralization and act as recorders of carbonatite petrogenesis (Atencio et al., 2010; Hogarth et al., 2000; Lumpkin and Ewing, 1995). The pyrochlore mineral group contains more than a dozen species although fluorcalciopyrochlore  $[(\text{Ca},\text{Na})_2(\text{Nb},\text{Ti})_2\text{O}_6(\text{O},\text{OH},\text{F})]$  (Hogarth, 1977) is an end-member that is usually exploited for Nb. A second economically important mineral in carbonatite is columbite-(Fe)  $[(\text{Fe},\text{Mn})(\text{Nb},\text{Ti})_2\text{O}_6]$ . Columbite is generally found as a primary mineral in granites and pegmatites (e.g. Cerný, 1989; Lumpkin 1998; Mulja et al., 1996); it is generally uncommon in carbonatites with the exception of a few occurrences as a secondary mineral (Mackay and Simandl, 2015; and references therein). Its presence as a primary mineral is rare (Mariano, 1989). Columbite can be a primary or an alteration product from pyrochlore through an igneous or hydrothermal event (Chakhmouradian et al., 2015; Heinrich, 1966; James and McKie, 1958; Mariano, 1989). James and McKie (1958) were the first to describe the alteration process from pyrochlore to columbite in carbonatite, later named columbitization (Heinrich 1966). The observation of fluorite grains in and around altered pyrochlores and inclusions of columbite within pyrochlore led them to propose columbitization. Alteration of pyrochlore has been studied recently (Chakhmouradian et al., 2015; Cordeiro et al., 2011;

Lumpkin and Ewing, 1995; Nasraoui and Bilal, 2000; Mitchell, 2015; Wall et al., 1996) in lateritic and relatively fresh carbonatites, demonstrating the origin of columbite from the alteration of pyrochlore.

The economic viability of Nb exploitations is influenced by the variation in size, shape and chemistry of Nb-bearing minerals as well as by the distribution of different Nb-bearing phases within a deposit. Therefore, a thorough understanding of the mechanisms that control Nb-hosting phases and their alteration are crucial for comprehending mineralization associated to carbonatites and possible causes of metallurgy issues, such as the alteration of minerals that can hinder economic exploitation.

The Saint-Honoré alkaline complex is an ideal setting for the study of carbonatites and their related Nb-hosting minerals as it is currently exploited and accessible to a depth of 808 m (2650 feet). Studies regarding mineralization (Fortin-Bélanger, 1977; Thivierge et al., 1983) have been conducted in the weathered upper portion of the carbonatite and more recent studies of the Saint-Honoré carbonatite only focused on REE mineralization (Fournier, 1993; Grenier et al., 2012; Néron, 2015; Néron et al., 2013) or the origin of ubiquitous halite (Kamenetsky et al., 2015). The main minerals exploited for Nb are fluorcalciopyrochlore (using the pyrochlore classification of Atencio et al. (2010)) and columbite-(Fe). There are four other pyrochlore species (e.g. Sr, Th or U-rich) present in the Saint-Honoré carbonatite (Belzile, 2009; Clow et al., 2011), but they are of minor importance.

Columbite from the Saint-Honoré carbonatite is part of the iron end-member and hence is classified as columbite-(Fe) (Burke, 2008) (previously named ferrocolumbite). With depth, columbite-(Fe) abundance increases, becoming a major Nb-bearing mineral. This pattern with depth provides new insights on the genesis of carbonatites, but also presents extractive metallurgy issues for exploitation. In this study, the petrogenesis of pyrochlore and columbite-(Fe) is investigated. The puzzling presence of halite grains observed in minute cavities of weakly altered pyrochlores provides clues about sodium remobilization in carbonatites and the contribution of halite to fenitization.

### ***1.1 Geological setting***

The Saint-Honoré alkaline complex is located in the Saguenay region, Québec (Canada). The regional bedrock is Canadian Shield and is mainly composed of Mesoproterozoic rocks of the Grenville Province (Dimroth et al., 1981; Higgins and van Breemen, 1996). Dimroth et al. (1981) divided the geological province into three units. The first is a gneiss complex that was deformed and migmatized during the Hudsonian Orogeny (1735 Ma). The second unit is comprised of anorthosite and charnockite-magnerite batholiths dating from pre- to post-Grenville orogeny (935 Ma). In the third unit, calc-alkaline intrusions cross-cut the host rocks. This late stage, the Iapetan rift system, is related to alkaline activity (Kumarapeli and Saull, 1966) and includes the intrusion of the Saint-Honoré alkaline complex.

The alkaline complex is composed of a crescent-shaped carbonatite surrounded by alkaline silicate rocks. The host rocks were fenitized by the emplacement of the complex and the fenitization is characterized by sodic-amphiboles, aegirine, sericitized plagioclases as well as green and red carbonate veins (Fortin-Bélanger, 1977). Silicate rocks are represented by three types of syenites: alkaline syenite, nepheline-bearing syenite and syenite foidolites (ijolite-urtite). The presence of xenoliths of altered syenites in the carbonatite suggests silicate rocks to be older than the carbonatite. K-Ar dating of the alkaline complex gave an age of 565 Ma (Doig and Barton, 1968). McCausland et al. (2009) report an Ar-Ar age of  $571 \pm 5$  Ma from phlogopite and Kamenetsky et al. (2015) report a two point Rb-Sr model age of  $564 \pm 8$  Ma. More recently, baddeleyite from lamprophyre dikes associated with the Saint-Honoré suite yielded a U-Pb age of  $582.1 \pm 1.8$  Ma (Michael Higgins, UQAC, personal communication, 2015). The carbonatite is covered by Ordovician black shale and limestone.

The carbonatite is generally composed of concentric, subvertical layers of various carbonate types, ranging from calcite in its external portion to dolomite and ankerite towards its core (Fortin-Bélanger, 1977; Thivierge et al., 1983) (Fig. 1). The ankerite facies is known to host an economic REE mineralization (Fournier, 1993; Grenier et al., 2012; Neron et al., 2013). The calcitic outer rim is barren of Nb and REE mineralization and are characterized by the presence of amphiboles. Underground, it is possible to observe several calcite-bearing dikes, lenses of semi-massive to massive magnetite and xenoliths of syenitic rocks throughout the dolomitic facies. Our textural observations, such as hydraulic fracturing and unaltered calcite grains, suggest the calcitic injections to

be from a younger episode of magmatism. The calcitic rocks within the dolomite facies are also younger than the calcitic rocks of the external portion of the carbonatite. This assumption is based on the comparison of accessory minerals, textures and alterations. In other words, the different carbonatitic layers of the Saint-Honoré complex are homogeneous at a regional scale (calcitic, dolomitic and ankeritic carbonates), but are very heterogeneous at the local scale. The complex patterns involving multiple generations of carbonatitic units and alteration fronts suggest a complicated history of multiple injections of differing composition and variable alteration fronts (Fig. 2).

## ***1.2 Mining overview***

The Saint-Honoré alkaline complex was first discovered by airborne radiometric surveys undertaken by SOQUEM (Société Québécoise d'Exploration Minière) in 1967, followed by two drilling campaigns in 1968 and 1970. Mining operations began in 1976. Reserves were recently estimated at 416 Mt grading 0.41% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Vallières et al., 2013). Exploitation is currently at a depth of 808 metres (2650 feet) and mineralization is open at depth. Production at the mine accounts for ~8–10% of the global production of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Papp, 2015). Phosphorus (Savard, 1981) and LREE in the Saint-Honoré complex (Grenier et al., 2013; Néron et al., 2013) are also being considered for future exploitation.

## 2. Methods

### *2.1 Sample collection and preparation*

Two drill holes at the 1600' level (~ 490 m) were selected; one facing north and one facing south. These drill holes were selected to cover a wide spectrum of mineralogical assemblages and to allow for study of the dolomitic and calcitic mineralized zones. Furthermore, no supergene alteration hinders mineralogy and textures at this depth. During sampling, we ensured that mineralization samples were collected from different facies so as to best represent the carbonatite. At present, niobium mineralization in the different Nb-bearing minerals is not evenly distributed in the deposit. The southern portion of the carbonatite is characterized predominantly by pyrochlore mineralization whereas the northern portion contains a higher proportion of columbite-(Fe). The north-facing drill hole length is 235 m and is inclined downwards at 6 °. The length of the south-facing drill hole is 115 m and dips at 31 °. A third drill hole was selected at the 2100-foot level (~ 640 m) to ensure representability at depth.

From the cores recovered from the upper two drill holes, 73 polished thin sections were produced. Twenty-three polished thin sections were prepared from the lower drill hole. Thin sections were prepared by Vancouver Petrographics Ltd (British Columbia), IOS Services Géoscientifiques inc. (Québec) and Atelier de Pétrographie (Québec). Nine additional polished thin sections of mineralized lenses from the three drill holes were prepared by Core Laboratories Canada Ltd (Alberta) with a water-free lubricant (acetone) to preserve water-soluble chlorides.



## ***2.2 Sample analysis***

We conducted macroscopic observations and selected samples under the supervision of mine geologists. For microscopic observations, we used a Nikon Eclipse E200 polarized light microscope equipped with a reflected light, an ocular lens of 10x, and objectives of 2x, 10x and 40x.

Cathodoluminescence imaging was conducted at the Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) using a CITL Mk5-1 coupled with a cathodoluminescence stage (Cambridge Image Technology Ltd, Cambridge, UK) and an optical microscope. Most analyses were obtained under the settings of 0.003 mbar, 12 kV and 150  $\mu$ A. However, voltage and current were often increased to 18 kV and 200  $\mu$ A, respectively, to observe more discrete colours and zonings.

A scanning electron microscope (SEM) (JEOL JSM-6480LV) equipped with an energy dispersive spectroscopy (EDS) (Oxford x-act) based at UQAC was used to produce back-scattered electron (BSE) images. Analysis parameters were 15 kV and a working distance of 12 mm. The EDS-SEM was used to identify Nb-bearing minerals and undetermined inclusions as well as to confirm the presence of chlorides on thin sections prepared with acetone.

Major elements were analyzed using a microprobe (JEOL JXA-8900L) at McGill University (Montréal, Québec, Canada) having the parameters set at 15 kV, 20 nA and a beam size of 10  $\mu$ m. A number of analyses used a beam size of 5  $\mu$ m to characterize thin

zoning and to identify micrometric inclusions within pyrochlore. We applied the ZAF method for matrix corrections.

Trace elements in pyrochlore and columbite-(Fe) were analyzed by a laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). Our analyses used an UP-213 laser ablation system (213 nm) from New Wave Research coupled with an Agilent 7700x ICP-MS. Calibration was performed by using NIST SRM-610 for pyrochlore using  $^{44}\text{Ca}$  as internal standard and GSE-1G for columbite-(Fe) analysis using  $^{57}\text{Fe}$  as internal standard. The beam diameter was 100  $\mu\text{m}$  with a pulsing rate of 20Hz.

### **3. Results**

#### ***3.1 Petrography of the niobium-bearing units***

The niobium mineralization is predominantly distributed within the dolomitic portion of the carbonatite although it may also be found in minor amounts within the calcitic facies. There is no significant Nb mineralization in the central ankeritic core of the carbonatite. This study focuses solely on the Nb-bearing units comprising the dolomitic facies and younger mineralized calcitic units enclosed within the dolomitic facies.

The carbonatite is strongly banded at a centimetre to metre scale (Fig. 2). Mineral proportions are highly variable both between and within the bands. Niobium mineralization appears in the form of elongated subvertical lenses varying from a few millimetres to several metres in width and having a complex geometry. These lenses are

also visible within the calcitic units enclosed within the broad dolomitic assemblage. Other petrological units are also observed, including xenoliths of syenites, glimmerites and cumulates of magnetite.

### ***3.1.1 Dolomitic rocks***

The dolomitic facies is characterized by the same mineralogical assemblage throughout the complex, composed mainly of medium-sized hypidiomorphic, cleavage-less dolomite grains with accessory minerals including phlogopite, magnetite, pyrite and various types of apatite. Ilmenite, hematite, sphalerite, chlorite, amphibole, quartz, zircon, barite and REE minerals (e.g. bastnaesite and monazite) are also present in trace amounts. Accessory minerals appear disseminated within the carbonatite or concentrated in bands (flowbanding?) forming economic lenses (Fig. 3). The dolomite is generally equigranular having calcite and strontianite inclusions and showing no apparent zoning (Fig. 4a). Dolomite does not show any obvious calcitization nor replacement by a secondary mineral. Mineralization is composed of fluorcalciopyrochlore and columbite-(Fe). The dolomitic rocks are usually weakly to moderately altered and are characterized under polarized light by greyish dolomite grains, a light chloritization of phlogopite and a darkening of pyrochlore grains. Rare lamellae of calcite are also observed within some phlogopite grains. Otherwise, textures and mineralogy of the dolomitic facies are fairly straight-forward.

### ***3.1.2 Enclosed calcitic units***

Enclosed calcitic units are subvertical across the dolomitic units. Hydraulic fracturing of the dolomite rocks near the margins of the calcitic rocks also confirms the interpretation of later calcitic injections (Fig. 4d). They are mineralized and are—mineralogically-speaking—different from the outer barren calcitic unit of the carbonatite. For example, the outer calcitic unit holds amphiboles and has a green pervasive tint, features not observed in the calcite injections. Unlike the dolomitic rocks, calcitic rocks are medium- to coarse-grained and are idiomorphic with apparent cleavages (Fig. 4b). A mosaic polygonal texture is often visible, but grains are not deformed as is often observed in many other carbonatites (Chakhmouradian et al., 2016). Accessory minerals (Ap, Mag, Phl, Py) are the same as those found in the dolomitic facies, however they are mostly disseminated. The calcitic injections are not altered suggesting they crystallized after the alteration event. Furthermore, pyrochlores found in this facies are idiomorphic, often zoned, unaltered and hence light brown. Columbite-(Fe) grains observed in the calcitic injections are heavily fractured and are interpreted as antecrysts from the dolomitic facies.

### ***3.2 Nb mineralization***

At the 1600' (~ 485 m) level, the petrography of the mineralization shows that fluorcalciopyrochlore and columbite-(Fe) account for approximately 65% and 35%, respectively, of Nb mineralization. As fluorcalciopyrochlore and columbite-(Fe) are the most abundant and main minerals exploited for Nb at the Saint-Honoré carbonatite, only these two minerals are considered for the remainder of this study.

### ***3.3 Fluorcalciopyrochlore***

For our purposes, fluorcalciopyrochlore will be referred to as pyrochlore (Pcl) given that other pyrochlore species are much less abundant and have not been as extensively studied. Fluorcalciopyrochlore (pyrochlore) has been the main mineral exploited for Nb at the Saint-Honoré deposit since 1971. Unaltered pyrochlore grains are usually euhedral, 0.01–2 mm in size, up to a centimetre in a few samples. They are usually light brown to grey with a greenish tint. A few grains are zoned (Fig. 5) and are usually inclusion-free, excepting a few apatite or rare pyrite inclusions. Most of the economic pyrochlore mineralization is associated with magmatic apatite (AP1) in bands, lenses or clusters within the dolomitic unit (Fig. 6). Pyrochlore grains are also distributed randomly in the carbonatitic matrix, but at a much lower proportion. Coarser and zoned pyrochlores are also observed in the calcitic units. The geochemistry of unaltered pyrochlores show the expected major elements: Ca, Na, Ti and F (Table 1). Fresh, weakly and moderately altered pyrochlores are distinguished by the proportion of pores, their colour (from brown to blackish) and their shapes, varying from octahedral to anhedral.

### ***3.4 Columbite-(Fe)***

In hand samples, columbite-(Fe) can easily be misidentified as magnetite. It is black with varying shapes and sizes (ranges from 10 µm–1 mm). Under cathodoluminescence, inclusions of calcite and fluorite are easily distinguished by orange and blue colours, respectively (Fig. 5). The inclusions are irregular in shape and may account for up to 50% of a columbite-(Fe) grain. Calcite and/or fluorite inclusions are a discriminating characteristic of columbite-(Fe). As with pyrochlore, columbite-(Fe) is observed to be

disseminated within the dolomitic matrix, but is in a higher proportion within magmatic apatite (AP1). In general, there is an orange microcrystalline apatite (AP2) associated with columbite-(Fe) (Fig. 6). AP2 is orange in hand samples, but is dark orange unless under strong light under the microscope. The rock is generally more altered (darkened dolomite grains and partly chloritized phlogopite) when columbite-(Fe) is present rather than pyrochlore. A few grains of columbite-(Fe) are observed in the calcitic rocks as detrital xenocrysts with no inclusions of calcite or fluorite. Nevertheless, unlike pyrochlore, columbite-(Fe) grains show no zoning and are generally observed in association with altered dolomite intersected by very fine-grained orange apatite (AP2). Unlike pyrochlore, columbite-(Fe) does not have a significant content of Ca, Na and F. However, it does have a high amount of Fe and Mn (Table 2).

### ***3.5 Trace elements in Nb mineralization***

LA-ICP-MS analysis was performed on five pyrochlore and five columbite-(Fe) samples to characterize the trace elements in both minerals (Table 3). Elements including Al, Si, K, Zr, Ta and Hf do not show any significant difference between pyrochlore and columbite-(Fe). These elements, except for K that is undocumented in the pyrochlore crystal structure, are generally found in the B-site and are therefore immobile (Atencio et al., 2010). Pyrochlore has a very high Th content compared to columbite-(Fe). On the other hand, columbite-(Fe) is enriched in U and it does not follow the same trend as Th as normally expected (both are recognized as being held in the A-site). Transitional metals such as V are surprisingly high in columbite-(Fe), up to 100 times higher than in the pyrochlore samples (Fig. 7).

Rare earth elements also display large variations between pyrochlore and columbite-(Fe) samples. LREEs are nearly ten times higher in terms of proportion in pyrochlore compared to columbite-(Fe) (Table 3, Figs. 7 & 8). Alternatively, HREEs and Y are characteristically higher in columbite-(Fe). A comparison of the median content of REEs in pyrochlore from the Aley carbonatite (Chakhmouradian et al., 2015) and pyrochlore from the Saint-Honoré carbonatite show lower or similar amounts. Major elements (e.g. Na, Ca, F) are, however, found at higher amounts in pyrochlores from Saint-Honoré than in those found in the Aley carbonatite.

### ***3.6 Crystallization of halite***

Sodium is a major cation in fluorcalciopyrochlore at the Saint-Honoré carbonatite. While Ca and F are both observed as inclusions of calcite and fluorine within columbite-(Fe), Na-bearing minerals are not observed as inclusions. However, halite is ubiquitous in the Saint-Honoré carbonatite (Guillaume Matton, Niobec Inc., personal communication, 2015) and is either observed disseminated or filling fractures. In moderately altered pyrochlores, halite was associated with calcite and fluorite inclusions. No halite was observed, however, within fresh pyrochlore nor within columbite-(Fe) grains.

## **4. Discussion**

The study of the mineralization showed a strong association of pyrochlore and columbite-(Fe) with the accessory minerals. An intrinsic relationship between pyrochlore and columbite-(Fe) was also identified by the presence of calcite and fluorite inclusions under

cathodoluminescence and, under SEM analysis, grains showing ongoing alteration from pyrochlore into columbite-(Fe). Alteration appears to be hydrothermal and the enrichment of Cl in columbite-(Fe) reinforces this interpretation. Chloride, along with leached Na from pyrochlore, could be involved in the formation of halite.

#### ***4.1 Petrology of the Nb-bearing units and mineralization***

Within the dolomitic units, apatite and other accessory minerals (Phl, Mag, Py) are agglomerated in lenses. They may appear foliation-like and could be misinterpreted as representing deformation. However, considering the post-Grenvillian geological setting, it is more likely an igneous texture (flowbanding) induced by the low viscosity of the carbonatitic magma (Treiman, 1989).

Accessory minerals in the calcitic units are generally disseminated and lenses are less frequent. It suggests that the magma chamber was less eruptive in the late magmatic stage. These calcitic units are thought to be from a later event given their coarser grain size, the presence of well-developed cleavages and the absence of alteration. Pyrochlores in these calcitic units are euhedral and mostly unaltered. A few columbite-(Fe) grains are also visible, but they are highly fractured and without calcite and fluorite inclusions. These columbite-(Fe) grains are likely antecrysts from the dolomitic facies. Antecrysts refer to crystals that did not crystallize from the calcitic magma, but still have a relationship with the magma (as described in Charlier et al., 2005).



Mineralization is associated with accessory minerals and more specifically to apatite. Both columbite-(Fe) and fluorcalciopyrochlore are intimately associated with apatite, a common characteristic in carbonatites (Hogarth et al., 2000; Knudsen, 1989). The first type of apatite (AP1) is translucent, euhedral and zoned as described by Chakhmouradian et al. (2017). Primary textures suggest this apatite to be of magmatic origin. A few inclusions of AP1 were observed within pyrochlore grains suggesting it is syngenetic. AP1 and pyrochlore might have crystallized earlier in the magmatic evolution as Nb was probably transported with phosphate and fluorine complexes resulting in the co-precipitation of apatite and fluorcalciopyrochlore (Hogarth et al., 2000; Knudsen, 1989). As proposed by Jago and Gittins (1991), fluorine might lower melting temperatures, thereby precipitating pyrochlore. To have pyrochlore crystallized instead of other Nb-bearing minerals, the liquid must have more than 1% F (Mitchell and Kjarsgaard, 2004).

The second type of apatite, AP2, is fine-grained, anhedral and orange in both macroscopic and microscopic views. Magmatic apatites (AP1) appear to be in equilibrium with the AP2 episode as they are unmodified when cross-cut by AP2. However, AP1 produces a thin outer white rim under cathodoluminescence (Fig. 6d). The AP2 follows random patterns in the carbonatite. Most of the minerals in pyrochlore are altered by the AP2. For example, pyrochlore darkens, develops pores and has its tips truncated.

#### ***4.2 Alteration of pyrochlore***

Although some replacement of pyrochlore by columbite-(Fe) from Saint-Honoré has been documented (Mitchell, 2015), a lack of proper samples has previously hindered a complete interpretation. Our study provides more complete evidence for the removal of A-site cations and the transitional sequence of alteration of fluorcalciopyrochlore to columbite-(Fe).

According to theory (e.g. Lumpkin and Ewing, 1995), the first stage of the alteration of pyrochlore is the leaching of Na. When Na is completely leached, minor Fe and Mn began filling vacancies in the A-site. At the same time, F is slowly leached from the Y-site and Cl is suspected to replace F. Alteration then leaches Ca and Sr with Fe and Mn partly filling this vacancy leading to a crystal of composition (Fe,Mn)Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, referred to as columbite. Moreover, if alteration persists, tiny pores, as small as 1 µm, may be left (Fig. 10a). The pores are orientated and are related to zoning, crystal structure weaknesses or fractures. Inclusions of altered pyrochlore to columbite-(Fe) are also visible.

The alteration of pyrochlore correlates with the alteration level of the carbonates and other accessory minerals, such as phlogopite to chlorite. Thus, alteration of pyrochlore depends on its physical properties (fractures or any other crystal weaknesses) and corrosion along the alteration front. For the Saint-Honoré samples, BSE and microprobe images (Fig. 10) clearly show the columbitization process along margins and fractures. Pyrochlore is altered stepwise into columbite-(Fe) as the fluid weakens the structure

through leaching of the major cations. Pyrochlore is clearly not in equilibrium with the fluid; a pyrochlore in contact with a fully altered pyrochlore to columbite-(Fe) will tend to transform as well (Fig. 10).

In addition to the leaching of Na, Ca and Sr and their replacement by Fe and Mn on the A-site, other trace element levels are modified during alteration. Our microprobe and LA-ICP-MS analyses showed an enrichment of Cl, transition metals (Cr, V, Y) and HREEs as well as a decrease in LREEs in columbite-(Fe) relative to pyrochlore (Figs. 7 & 8). A loss in LREEs in columbite-(Fe) might be due to lower compatibility of LREEs than HREEs in common rock-forming minerals (Linnen et al., 2014) and are therefore leached out during alteration. Columbite-(Fe) had an average of  $510 \pm 155$  ppm Cl (Table 2) whereas pyrochlores had Cl concentrations below detection limit ( $70 \pm 160$  ppm Cl; Table 1). A Cl enrichment during alteration (Fig. 11) is therefore evident and a Cl-rich fluid suggests hydrothermal activity. Weathering can be dismissed as we observed no petrographic evidence, such as gypsum or karst, at the sampled levels. Geodes, karsts and highly altered carbonates are observed in the upper 120 m of the Saint-Honoré carbonatite (Thivierge et al., 1983), but not any deeper. Thus, supergene alteration as the source of Cl is less likely. Unfortunately, Cl in pyrochlore is poorly documented and its position in the crystal structure remains unclear. However, based on its chemical similarities with F, it is assumed to be replacing F in the Y-site.

In pyrochlore, the mean value of  $Y_2O_3$  is below detection limit ( $850 \pm 761$  ppm) while its content in columbite-(Fe) exceeds  $3920 \pm 754$  ppm. Yttrium behaves similarly to other

HREEs and is therefore considered as a heavy rare earth element *sensu lato*. It replaces A-site cations (Atencio et al., 2010). A HREE enrichment of a magnitude of  $\sim 5$  is observed in columbite-(Fe) (Tab. 3 & Fig. 7). This is similar to results from the Aley carbonatite where pyrochlore and fersmite were compared (Chakmouradian et al., 2015). This also agrees with the results of Néron (2013, unpublished data) who observed a HREE-rich rim around apatite and suggested a hydrothermal event for the REE mineralization in the Fe-carbonatite of the Saint-Honoré complex. No other primary mineral in the carbonatite has shown a considerable Y content. This suggests that Y and HREE did not originate from an earlier magmatic stage but from a later event. Given that differentiating pyrochlore and columbite-(Fe) rich units is important for the extraction of Nb, the monitoring of yttrium with a portable-XRF during logging is recommended.

The enrichments of Y, HREEs or any other metals could arguably have been related to a volume change due to columbite-(Fe) collapsing during alteration. A gain of roughly 10% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> is observed in columbite-(Fe) compared to unaltered pyrochlore. On the other hand, heavy REEs (including Y) increase 4 to 6 times (400%) in columbite-(Fe). Considering Nb is immobile and varies much less than any other enriched element, this hypothesis of an enrichment by a volume change is unlikely.

An intriguing transitional alteration state was also observed. The mineral is called “ferropyrochlore” by the mine geologists, although it does not fit the classification of Atencio et al. (2010). Geochemically, this pyrochlore has completely lost its Na, but only half of its Ca. As Ca is leached, it is replaced by Fe  $\pm$  Mn. Analyses have shown a

pyrochlore with 7% of FeO and 7% CaO. The sum of major divalent oxides (FeO+MnO+CaO+SrO) during alteration is stable at approximately 17% and increases above 21% when Ca is completely leached out and the alteration to columbite-(Fe) is complete. We strongly suggest a future in-depth analysis of this intermediary state of alteration. Fersmite is known as a transitional state of alteration of pyrochlore to columbite-(Fe) or as an alteration product of columbite-(Fe) (Lumpkin and Ewing, 1995). However, fersmite is not observed anywhere in the carbonatite.

#### ***4.3 Origin of alteration***

Based on Lumpkin and Ewing (1995), the ternary diagram of A-site monovalent and divalent cations and vacancies can be used to define the origin of the alteration. Alteration can be either a late magmatic alteration, a hydrothermal event or a supergene alteration (Nasraoui and Bilal, 2000; Zurevinski and Mitchell, 2004). At the Saint-Honoré carbonatite, the use of the ternary diagram is fairly straight-forward considering: (1) there are only two major A-site cations in pyrochlore, which are respectively monovalent and divalent (Na and Ca); (2) various samples show different stages of alteration of pyrochlore; and (3) more than 800 microprobe analyses were used. This includes 543 microprobe analyses from 1978 (SOQUEM) and 136 from 2011 (SGS Canada). To ensure reproducibility, we added 145 microprobe analyses performed on pyrochlore and columbite-(Fe).

Apfu (atoms per formula unit) of the A-site were calculated with a structural formula based on the assumption that B-site anions are immobile and therefore have a sum of two.

Results were plotted into the triangular (A-site monovalent and divalent cations and vacancy) plot to provide an alteration trend (Fig. 12). Fe and Mn introduced during alteration were calculated as A-site cations to evaluate more precisely the vacancy in the A-site. Otherwise, fully transformed pyrochlore to columbite-(Fe) would have plotted in the upper part of the vacancy field leading to a supergene alteration, although our observations clearly show that this is not the case for the Saint-Honoré complex. This is a false assumption considering that Fe and Mn are divalent cations (as are Ca and Sr) and are therefore required in the calculations. Moreover, this method was developed solely for pyrochlore and not for columbite-(Fe). However, plotting columbite-(Fe) with pyrochlore fits adequately in the diagram as it reinforces the alteration trend. Figure 12 clearly shows a transitional trend from a primary pyrochlore to a hydrothermally-altered pyrochlore into columbite-(Fe). This is in accordance with the higher Cl content of columbite-(Fe) and the HREE rim around AP1.

The hypothesis that hydrothermal activity is the cause of alteration is strengthened by the enrichment of Cl and HREEs in columbite-(Fe) (Tabs. 1 & 2). Chloride suggests an aqueous fluid whereas the presence of HREE follows a similar description of hydrothermal enrichment in the ankeritic core of the carbonatite (Néron 2015).

#### ***4.4 Origin of halite***

The presence of ubiquitous halite in the Saint-Honoré carbonatite is intriguing. Sodium is certainly magmatic in the Saint-Honoré carbonatite as it is a major constituent of fluorcalciopyrochlore (up to 8% Na<sub>2</sub>O), one of the first minerals with apatite to

crystallize in a carbonatitic magma (Hogarth et al., 2000; Knudsen, 1989). The strong relationship of pyrochlore to apatite and the textural evidence also argue for a magmatic origin.

The origin of chlorine is, however, enigmatic. Based on the spatial distribution of halite in and around magmatic minerals from the Saint-Honoré carbonatite, Kamenetsky et al. (2015) proposed halite, and specifically chlorine, to be mantle-derived. However, our study of the Nb-bearing minerals of the carbonatite offers a slightly different understanding of the petrogenesis of halite. Petrographic observations and geochemical analyses of pyrochlore and columbite-(Fe) demonstrate that Na was leached during alteration whereas Cl was related to hydrothermal fluid. Thus, the Na is considered as magmatic in origin and Cl as hydrothermal (Tremblay et al., in preparation). As such, these findings refine the idea of halite having a magmatic origin of Kamenetsky et al. (2015) and suggest a magmato-hydrothermal origin. The absence of Cl in other magmatic minerals (e.g. apatite and phlogopite) reinforces our hypothesis of a hybrid origin.

A mass balance study determined whether the alteration of pyrochlore was an important source of Na. We based our calculations on the Na content of 51,600 whole rock analyses. It is important to specify that these results come from various rock types of the mine property, including units having little halite. Values follow a lognormal distribution and range from below detection limit to 5.77% with a lognormal mean of 0.329%. The Cl content is from an unpublished environmental study of mine effluent. Analyses of 119 samples show a Cl content of 0.008 to 1.88% and an arithmetic mean value of 0.429%,

with a standard deviation of 0.337%. As the Cl/Na ratio is in halite 1.54, and  $0.429\%/1.54 > 0.329\%$ , then it is apparent that Na is the limiting factor. Since there are no other major Na-bearing minerals in the carbonatite other than pyrochlore and halite, a maximum proportion of 0.622% halite could be formed if all Na was used. Other chlorides were also observed, however only in anecdotic proportions; a few grains of sylvite (KCl), hydrophilite ( $\text{CaCl}_2$ ) and chloromagnesite ( $\text{MgCl}_2$ ) were identified during a SEM session. It is possible they may have been recrystallized during the preparation of the thin sections.

As pointed out by Kamenetsky et al. (2015), halite is also observed around or within pyrochlores or other magmatic minerals within the Saint-Honoré carbonatite. Our observations support this finding; we noted halite surrounding pyrochlores as well as within the pores of weakly altered pyrochlores (Fig. 9).

To quantify the amount of Na leached during the alteration of pyrochlore, the amount of pyrochlore in the carbonatite must be constrained. Historic whole rock analysis shows a mean  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  of 0.427% throughout the carbonatite, including drilling holes in barren units. Considering fluorcalciopyrochlore accounted for more than 95% of the Nb-bearing minerals (Nb-rutile and other minor phases account for less than 5%) before alteration, we calculate a disseminated 0.615% pyrochlore in the carbonatite. This is based on pyrochlore containing approximately 66%  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Hence, 0.615% pyrochlore at 5.42% Na (mean value of microprobe analysis) gives a weight percentage of 3.33% Na.



Therefore, if all pyrochlore is indeed altered into columbite-(Fe), thus limits the quantity of halite at 0.085%.

Based on the logarithmic mean content of Na (as Na has a log-normal distribution) in the carbonatite and the possible output of Na during alteration, pyrochlore alteration might contribute up to 10% of the necessary Na to form halite. Our results show that it is unlikely the Na needed to crystallize halite comes entirely from the alteration of pyrochlore; it was demonstrated, however, that it could contribute considerably. The remaining Na needed to form the halite is thought to come from a Na-rich late-magmatic event that was affected by hydrothermal activity, solubilizing Na and forming halite as soon as parameters had changed. Furthermore, current resource estimates at the mine suggest that the proportion of pyrochlore increases with depth. If true, the presence of Na would be higher and hence contribute even more to the mass balance. At even greater depths, it is possible that with the increased proportion of pyrochlore, Na from these pyrochlore units could have been released during hydrothermalism and, because Na is easily soluble, it could have been transported upwards in the carbonatite to form halite. This would reinforce our idea of pyrochlore alteration being a major contributor of Na.

## **5. Conclusion**

The Saint-Honoré carbonatite offers a significant opportunity to study carbonatites: fresh rocks are available down to ~640 m deep and are devoid of weathering below ~120 m. Samples are easily accessible and very abundant. The petrological study of the main Nb-bearing minerals, fluorcalciopyrochlore and columbite-(Fe), shed light on their genesis

and the alteration process. Grains of varying alteration levels showed transitional states of alteration beginning at the crystal margins or within fractures. Na, Ca and F are gradually leached out, creating a vacancy as the crystal structure changes. During this process, inclusions of calcite and fluorite are formed within columbite-(Fe). A few weakly altered pyrochlores had preserved halite in their pores. The Cl, Y and HREE enrichments in columbite-(Fe) and the leaching of LREEs suggest this is a possible source of crystallization of halite and a HREE-bearing, water-rich fluid. This refines the observations of Kamenetsky et al. (2015) for halite presence and an enrichment by hydrothermalism (Néron et al., 2013) of HREEs in apatite in ankeritic rocks at Saint-Honoré.

Considering that most carbonatites are studied from outcrop samples or through shallow drilling where weathering is prevalent, this study provides much needed insight into the deeper evolution of carbonatites. We also provided new information in regards to the columbitization process and the formation of ubiquitous halite in the Saint-Honoré carbonatite. Chloride could have played an important role in the transport of REEs in ankeritic rocks. The presence of Cl along with HREEs within columbite-(Fe) suggest that the chlorine complex is an excellent carrier for REE as proposed by Migdisov and Williams-Jones (2014).

## **Acknowledgments**

This work was supported by a Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada grant to L. Paul Bédard. The UQAC Foundation and DIVEX are thanked for

scholarship funds to first author. Our discussions about the deposit with Alexis Gauthier-Ross and Louis-Mathieu Tremblay of Niobec inc. were greatly appreciated. Vadim Kamenetsky is thanked for sharing his additional data and pictures of the halite from Saint-Honoré. The manuscript had its English improved by Murray Hay (Maxafeau Editing Services).

## References

- Atencio, D., Andrade, M.B., Christy, A.G., Gieré, R., and Kartashov, P.M., 2010. The pyrochlore supergroup of minerals: Nomenclature. *The Canadian Mineralogist*, 48, 673–698.
- Belzile, E., 2009. NI 43-101 Technical report for Niobec Mine, Quebec, Canada, February 2009. IAMGOLD Corporation, 104p.
- Burke, E.A.J., 2008. Tidying up mineral names: An IMA-CNMNC scheme for suffixes, hyphens and diacritical marks. *The Mineralogical Record*, 39, 131–135.
- Cerný, P., 1989. Characteristics of pegmatite deposits of tantalum. In: Möller, P., Cerný, P., and Saupé, F. (eds.) *Lanthanides, Tantalum and Niobium*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 195–239.
- Chakhmouradian, A.R., Reguir, E.P., Zaitsev, A.N., Couëslan, C., Xu, Cheng, Kynický, J., Mumin, A.H., and Yang, P., 2017. Apatite in carbonatitic rocks: Compositional variation, zoning, element partitioning and petrogenetic significance. *Lithos*, 274–275, 188–213.
- Chakhmouradian, A.R., Reguir, E.P., and Zaitsev, A.N., 2016. Calcite and dolomite in intrusive carbonatites. I. Textural variations. *Mineralogy and Petrology*, 110, 333–360.
- Chakhmouradian, A.R., Reguir, E.P., Kressall, R.D., Crozier, J., Pisiak, L.K., Sidhu, R., and Yang, P., 2015. Carbonatite-hosted niobium deposit at Aley, northern British Columbia (Canada): Mineralogy, geochemistry and petrogenesis. *Ore Geology Reviews*, 64, 642–666.
- Charlier, B.L.A., Wilson, C.J.N., Lowenstern, J.B., Blake, S., Van Calsteren, P.W., and Davidson, J.P., 2005. Magma generation at a large, hyperactive silicic volcano (Taupo, New Zealand) revealed by U-Th and U-Pb systematics in zircons. *Journal of Petrology*, 46, 3–32.
- Clow, G.G., Salmon, B., Lavigne, M., McDonough, B., Pelletier, P., and Vallières, D., 2011. NI 43-101 Technical report on expansion options at the Niobec mine, Québec, Canada. IAMGOLD Corporation, 204p.
- Cordeiro, P.F.O., Brod, J.A., Palmieri, M., Oliveira, C.D., Barbosa, E.S.R., Santos, R.V., Gaspar, J.C., and Assis, L.C., 2011. The Catalão I niobium deposit, central Brazil: Resources, geology and pyrochlore chemistry. *Ore Geology Reviews*, 41, 112–121.
- Decrée, S., Boulvais, P., Tack, L., André, L., and Baele, J.-M., 2015. Fluorapatite in carbonatite-related phosphate deposits: the case of the Matongo carbonatite (Burundi). *Mineralium Deposita*, 51, 453–466.

- Dimroth, E., Woussen, G., and Roy, D.W., 1981. Geologic history of the Saguenay Region, Quebec (Central Granulite Terrain of the Grenville Province): a working hypothesis. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 1506–1522.
- Doig, R., and Barton, J.M., 1968. Ages of carbonatites and other alkaline rock in Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 7, 22–28.
- Fortin-Bélanger, M., 1977. Le complexe annulaire à carbonatites de St-Honoré (P.Q. Canada) et sa minéralisation à niobium : étude pétrographique et géochimique. M.Sc. thesis, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Canada, 210p.
- Fournier, A., 1993. Magmatic and hydrothermal controls of LREE mineralization of the St-Honoré Carbonatite, Québec. Unpublished M.Sc. thesis, McGill University, Montréal, Canada, 95p.
- Grenier, L., Tremblay, J.F., and Sirois, R., 2013. NI 43-101 Technical report, updated mineral resource estimate for rare earth elements, 2012. IAMGOLD Corporation, 166p. <http://www.infomine.com/index/pr/PB/39/93/PB399305.PDF>. Accessed March 13, 2017.
- Heinrich, E.W., 1970. The Palabora carbonatitic complex; a unique copper deposit. *The Canadian Mineralogist*, 10, 585–598.
- Heinrich, E.W., 1966. The geology of carbonatites. Rand McNally, Chicago. 555p.
- Higgins, M.D., and van Breemen, O., 1996. Three generations of anorthosite-mangerite-charnockite-granite (AMCG) magmatism, contact metamorphism and tectonism in the Saguenay-Lac-Saint-Jean region of the Grenville Province, Canada. *Precambrian Research*, 79, 327–346.
- Hogarth, D.D., Williams, C.T., and Jones, P., 2000. Fresh rock zoning in pyrochlore group minerals from carbonatites. *Mineralogical Magazine*, 64, 683–697.
- Hogarth, D.D., 1977. Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *American Mineralogist*, 62, 403–410.
- James, T.C., and McKie, D., 1958. The alteration of pyrochlore to columbite in carbonatites in Tanganyika. *Journal of the Mineralogical Society*, 31, 889–902.
- Jago, B.B., and Gittins, J., 1991. The role of fluorine in carbonatite magma evolution. *Nature*, 349, 56–58.
- Kamenetsky, V.S., Mitchell, R.H., Maas, R., Giuliani, A., Gaboury, D., and Zhitova, L., 2015. Chlorine in mantle-derived carbonatite melts revealed by halite in the St.-Honoré intrusion (Québec, Canada). *Geology*, 43, 687–690.
- Knudsen, C., 1989. Pyrochlore group minerals from the Qaqarssuk carbonatite complex. In: Möller, P., Cerný, P., and Saupé, F. (eds.) *Lanthanides, Tantalum and Niobium*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 80–99.

- Kumarapeli, P.S., and Saull, V.A., 1966. The St. Lawrence valley system: A North American equivalent of the East African rift valley system. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 3, 639–658.
- Le Bas, M.J., 1981. Carbonatite magmas. *Mineralogical Magazine*, 44, 133–140.
- Linnen, R.L., Samson, I.M., Williams-Jones, A.E., and Chakhmouradian, A.R., 2014. Geochemistry of the rare-earth element, Nb, Ta, Hf, and Zr deposits. In: Holland, H.D., and Turekian, K.K. (eds.) *Treatise on Geochemistry*, Second Edition, Oxford: Elsevier, 13, 543–568.
- Lumpkin, G.R., 1998. Composition and structural state of columbite – tantalite from the Harding Pegmatite, Taos County, New Mexico. *The Canadian Mineralogist*, 36, 585–599.
- Lumpkin, G.R., and Ewing, R.C., 1995. Geochemical alteration of pyrochlore group minerals: Pyrochlore subgroup. *American Mineralogist*, 80, 732–743.
- Mackay, D.A.R., and Simandl, G.J., 2015. Pyrochlore and columbite-tantalite as indicator minerals for specialty metal deposits. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 15, 167–178.
- Mackay, D.A.R., and Simandl, G.J., 2014. Geology, market and supply chain of niobium and tantalum – a review. *Mineralium Deposita*, 49, 1025–1047.
- Mariano, A.N., 1989. Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks. In: Bell, K. (ed.) *Carbonatites: genesis and evolution*. Unwin Hyman, London, 149–176.
- McCausland, P.J., Pisarevsky, S., Jourdan, F., and Higgins, M., 2009. Laurentia at 571 Ma: Preliminary paleomagnetism and Ar-Ar age of the Ediacaran St Honore alkali intrusion, Quebec. *Proceedings, American Geophysical Union–Geological Association of Canada–Mineralogical Association of Canada–Canadian Geophysical Union, Joint Assembly, Toronto*, Abstract GA12A–01.
- Migdisov, A., and Williams-Jones, A.E., 2014. Hydrothermal transport and deposition of the rare earth elements by fluorine-bearing aqueous liquids. *Mineralium Deposita*, 49, 987–997.
- Mitchell, R.H., 2015. Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites. *Ore Geology Reviews*, 64, 626–641.
- Mitchell, R.H., Kjarsgaard, B.A., 2004. Solubility of niobium in the system  $\text{CaCO}_3\text{-CaF}_2\text{-NaNbO}_3$  at 0.1 GPa pressure: implications for the crystallization of pyrochlore from carbonatite magma. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148, 281–287.

- Mulja, T., Williams-Jones, A.E., Martin, R.F., and Wood, S.A., 1996. Compositional variation and structural state of columbite-tantalite in rare-element granitic pegmatites of the Preissac-Lacorne batholith, Quebec, Canada. *American Mineralogist*, 81, 146–157.
- Nasraoui, M., and Bilal, E., 2000. Pyrochlores from the Lueshe carbonatite complex (Democratic Republic of Congo): a geochemical record of different alteration stages. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18, 237–251.
- Néron, A., 2015. Caractérisation de la minéralisation de la zone à terres rares de la carbonatite de Saint-Honoré, Québec, Canada. M.Sc. thesis, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, Canada, 70p.
- Néron, A., Bédard, L.P., Gaboury, D., and Thivierge, S., 2013. Preliminary characterization of the REE mineralization of the St-Honoré ferro-carbonatite (Québec, Canada). Mineral deposit research for a high-tech world: 12th Society for Geology Applied to Mineral Deposits (SGA) biennial meeting in Uppsala (Sweden), Program with Abstracts.
- Papp, J.F., 2015. Niobium (Columbium). In: United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2015, 110–111.
- Roskill, 2017. Niobium: Market outlook to 2017, 12<sup>th</sup> edition. <https://roskill.com/product/niobium-market-outlook-2017/>. Accessed March 13, 2017.
- Savard, J.Y., 1981. Étude de mise en valeur des rejets de carbonate-apatite de la mine Niobec dans le but d’une utilisation comme engrais en agriculture. M.Sc. thesis, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, Canada, 147p.
- Thivierge, S., Roy, D.-W., Chown, E.H., and Gauthier, A., 1983. Évolution du complexe alcalin de St.-Honoré (Québec) après sa mise en place. *Mineralium Deposita*, 18, 267–283.
- Treiman, A.H., 1989. Carbonatite magma: properties and processes. In: Bell, K. (ed.) *Carbonatites: genesis and evolution*. Unwin Hyman, 89–104.
- Vallières, D., Ferlatte, G., Sirois, R., Tremblay, J.-F., Pelletier, P., and Gaultier, P., 2013. NI 43-101 Technical Report, Update on Niobec Expansion, December 2013. 305p.
- Wall, F., Williams, C.T., and Woolley, A.R., 1996. Pyrochlore from weathered carbonatite at Lueshe, Zaire. *Mineralogical Magazine*, 60, 731–750.
- Wall, F., Williams, C.T., Woolley, A.R., 1999. Pyrochlore in niobium ore deposits. In: Stanley, C.J. (ed.) *Mineral deposits: processes to processing*. Balkema Publishers, Rotterdam 1, 687–690.
- Wyllie, P.J., 1966. Experimental studies of carbonatite problems: the origin and differentiation of carbonatite magmas. In: Tuttle, O.F., and Gittins, J. (eds.) *Carbonatites*. Interscience Publishers, New York, 311–352.

Zurevinski, S.E., and Mitchell, R.H., 2004. Extreme compositional variation of pyrochlore-group minerals at the Oka carbonatite complex, Quebec: Evidence of magma mixing? *The Canadian Mineralogist*, 42, 1159–1168.



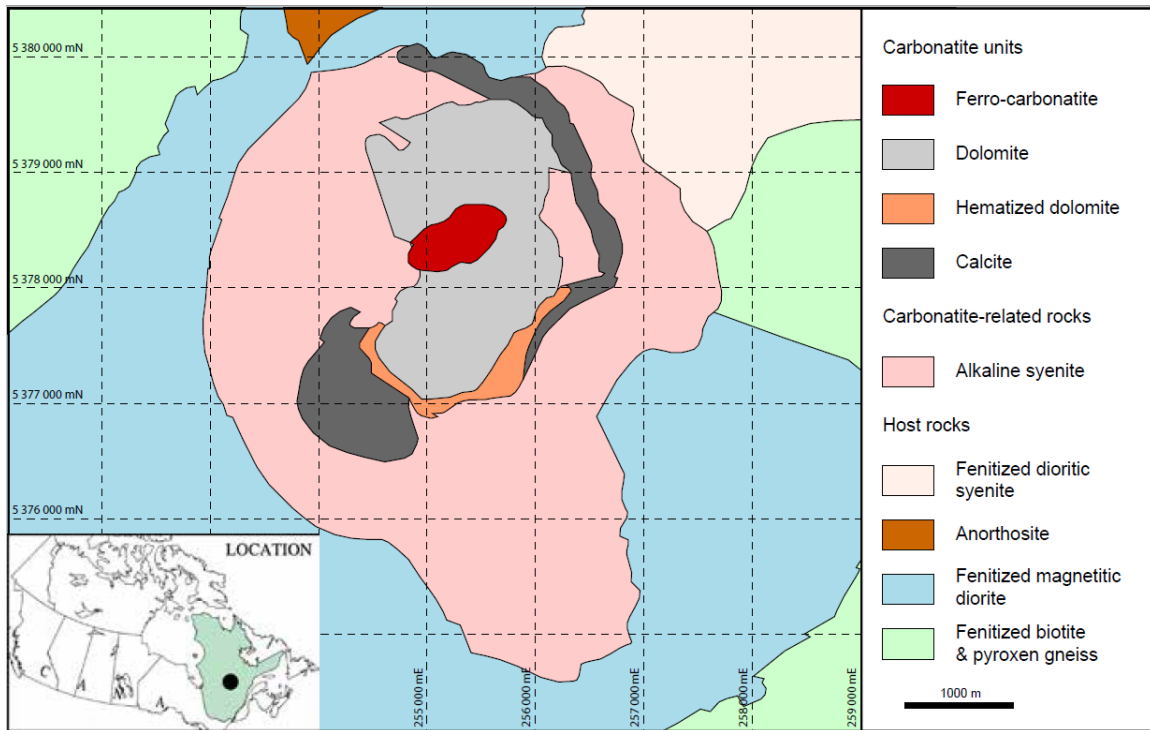


Figure 1: Simplified geological map of the Saint-Honoré alkaline complex (Modified from Vallières et al., 2013). The economically Nb-bearing unit is the dolomitic carbonatite unit.

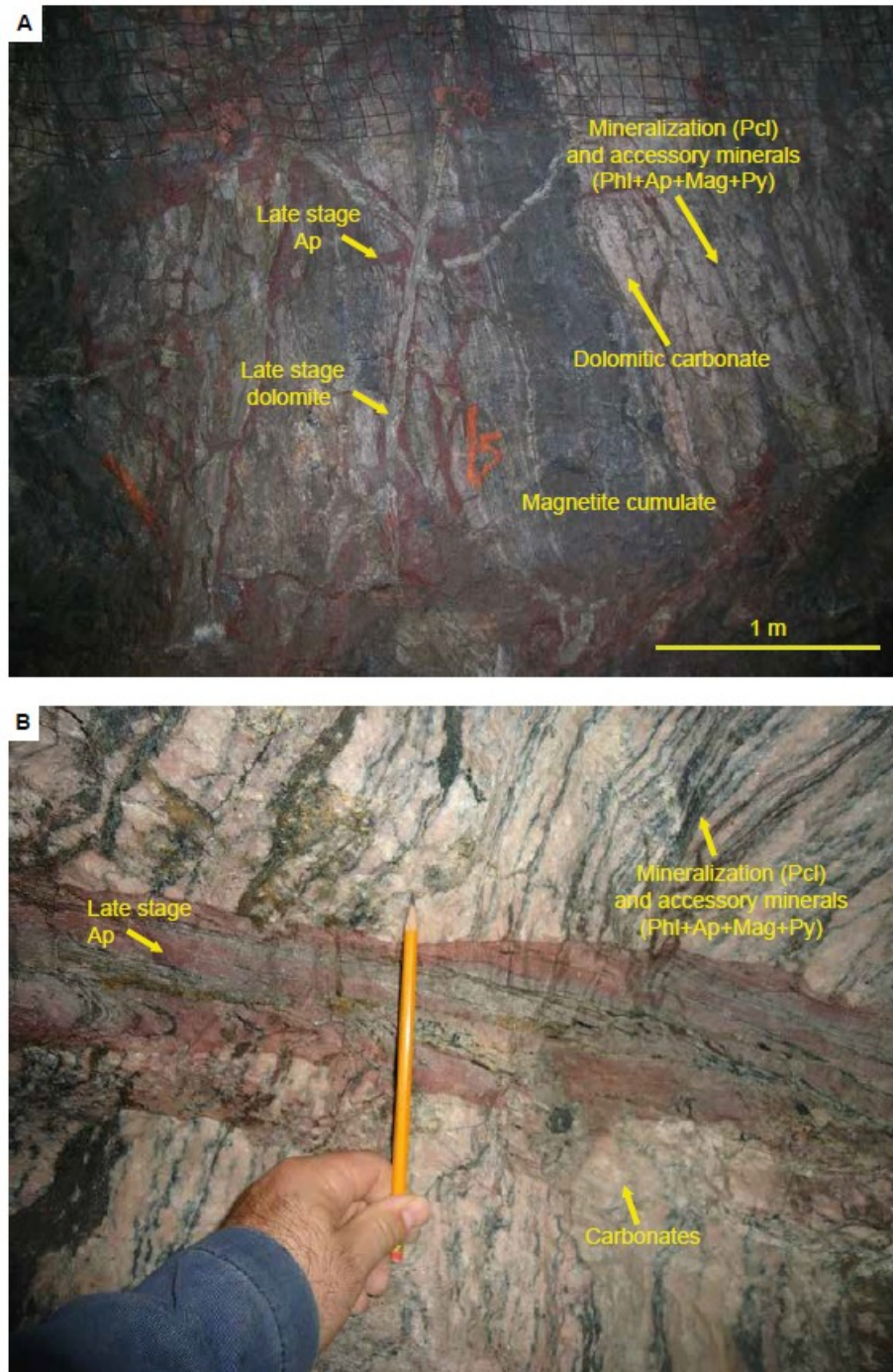


Figure 2: Underground views of mineralized zones. **A)** Dolomitic matrix with mineralized bands of varying size. Late injections of dolomite with late stage apatite (red) cross-cut the unit. **B)** A late fine-grained apatite vein cross-cuts the banded mineralized carbonatite (AP: apatite, Mag: magnetite, Phl: phlogopite, Py: pyrite, Pcl: pyrochlore).



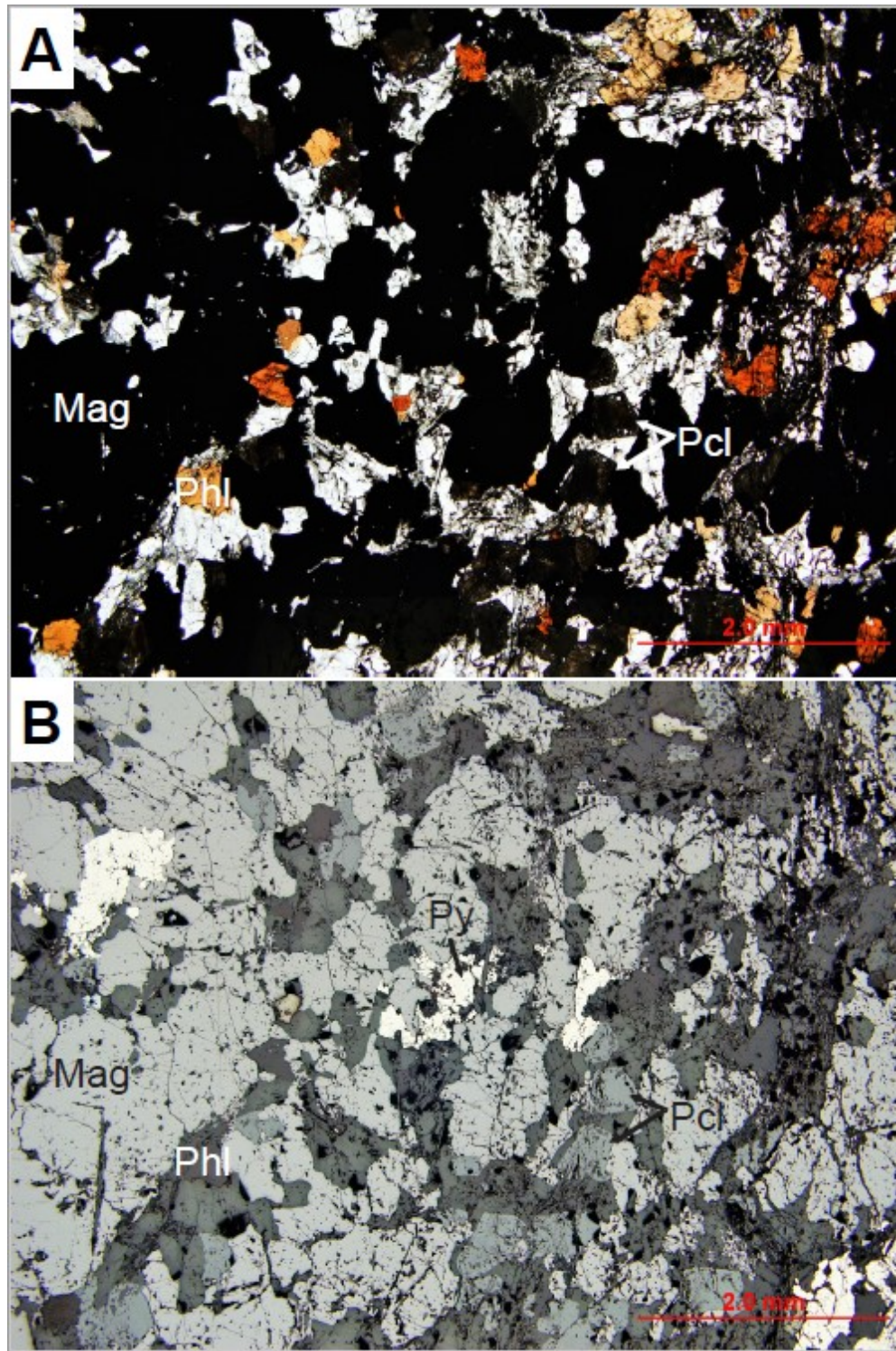


Figure 3: Polarized light (A) and reflected light (B) images of a lens of accessory minerals, including magnetite, phlogopite and pyrite in association with apatite and a few pyrochlore grains (Mag: magnetite, Pcl: pyrochlore, Phl: phlogopite, Py: pyrite).



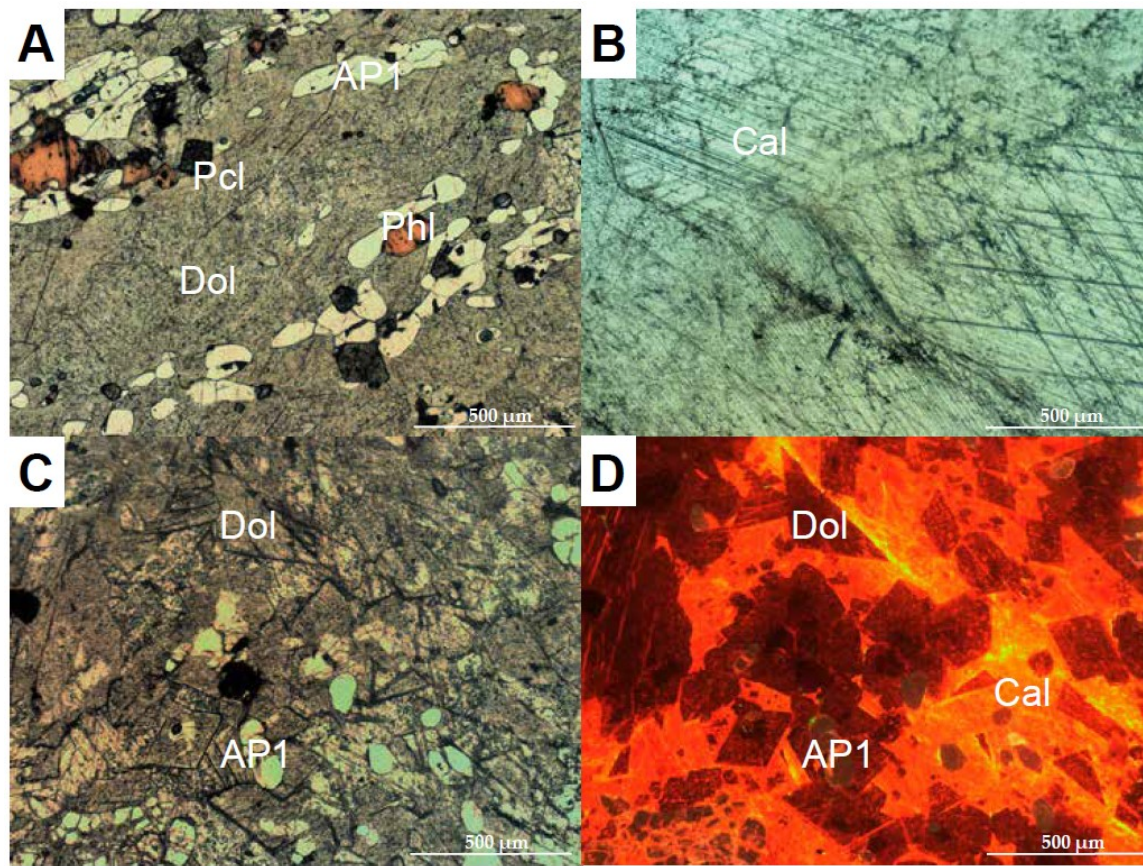


Figure 4: **A)** Polarized light image of altered dolomite (Dol; greyish) with accessory minerals (AP1, Phl and Pcl). **B)** Coarse-grained calcite (Cal) with apparent single and losangic cleavages. Polarized **(C)** and cathodoluminescence **(D)** images of hydraulic fracturing of dolomite by calcite. (Pcl: pyrochlore, Phl: phlogopite, AP1: apatite).

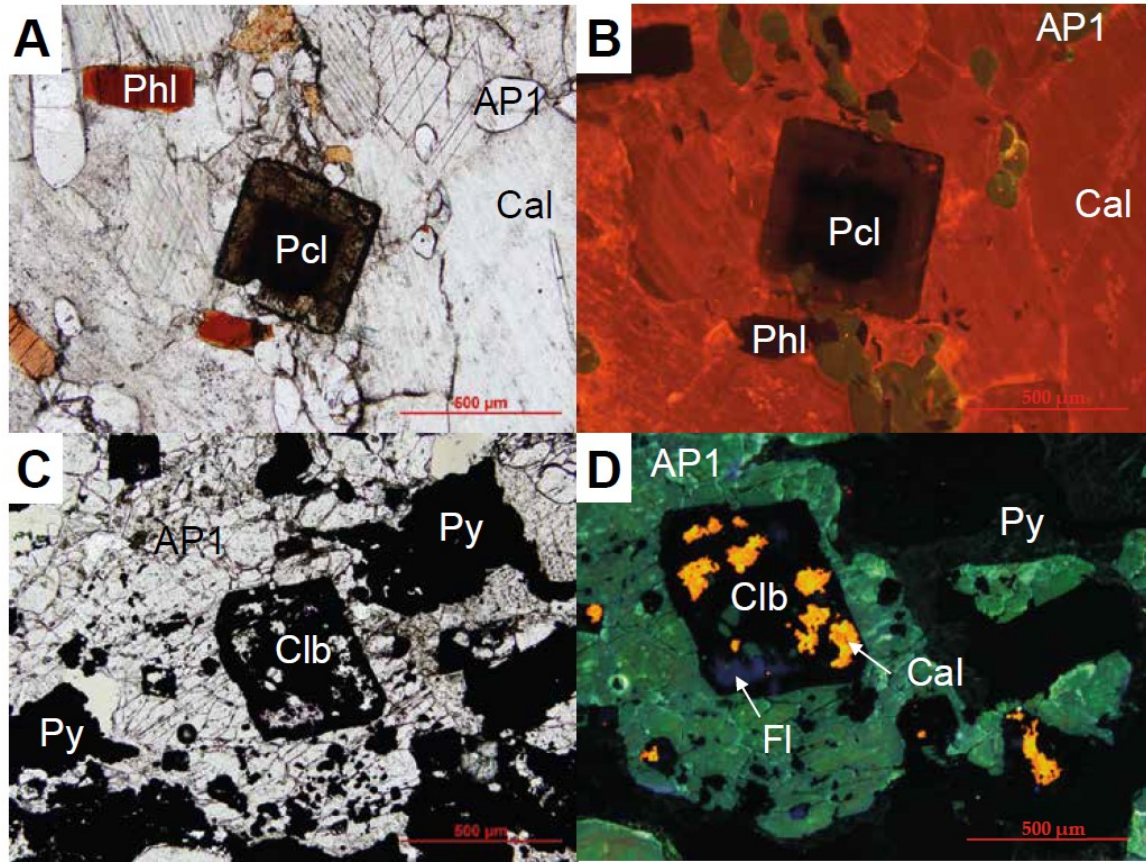


Figure 5: Images of euhedral pyrochlore under polarized light (A) and cathodoluminescence (B). Images of anhedral columbite-(Fe) with calcite and fluorite inclusions columbite-(Fe); under polarized light (C) and cathodoluminescence (D).



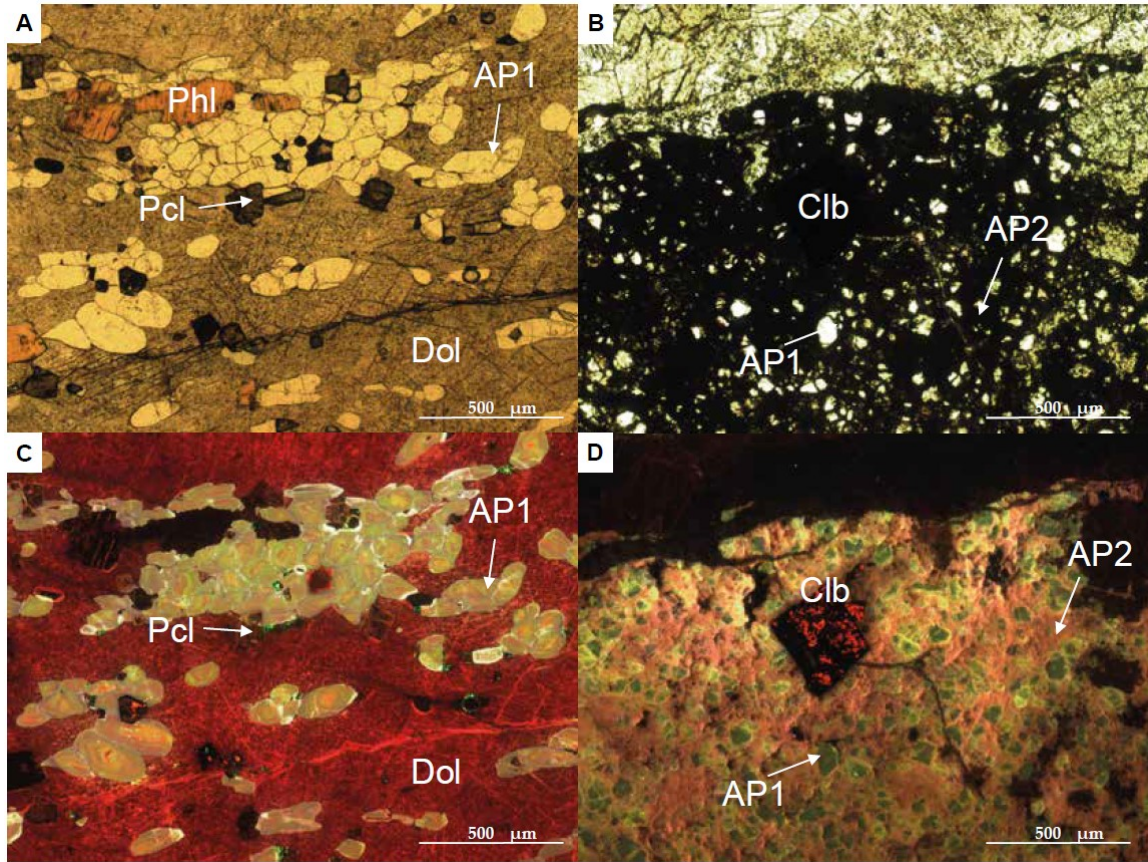


Figure 6: Euhedral pyrochlore associated with a magmatic apatite (AP1) cluster and accessory minerals: under polarized light (A) and cathodoluminescence (C). Columbite-(Fe) associated with dark orange apatite (AP2) altering carbonates: under polarized light (B) and cathodoluminescence (D). (Dol: dolomite, Phl: phlogopite, Py: pyrite, Pcl: pyrochlore, Clb: columbite-(Fe)).

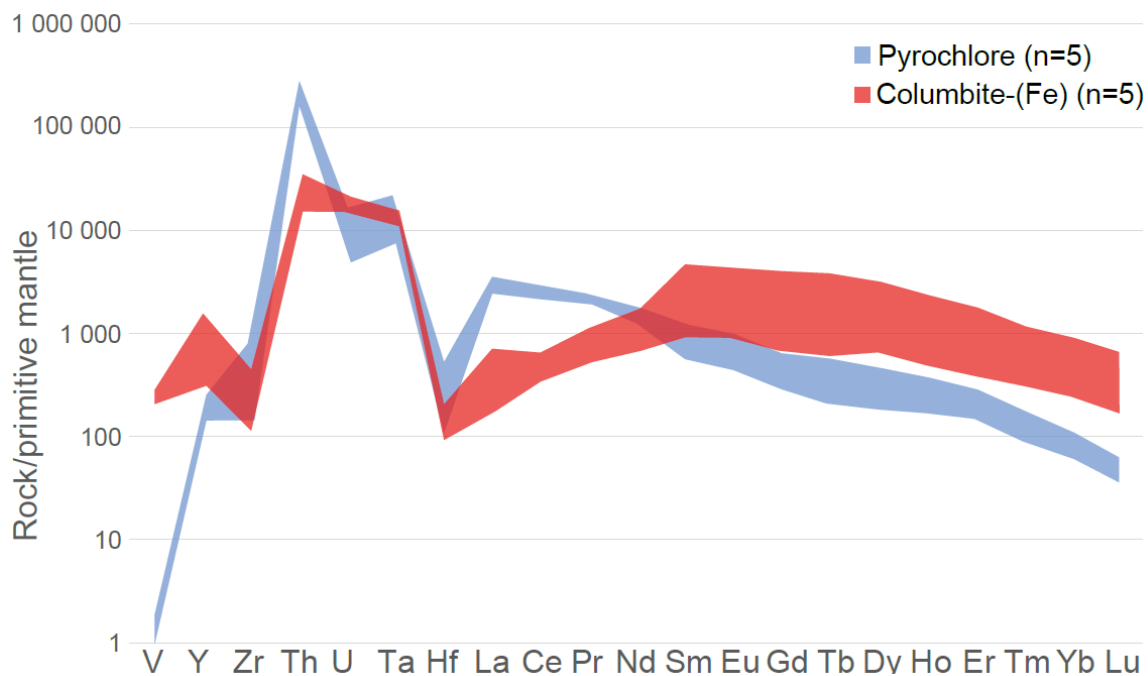


Figure 7: Primitive mantle-normalized trace elements in pyrochlore and columbite-(Fe) from the Saint-Honoré carbonatite. A considerable increase in V and Y is visible. Data from LA-ICP-MS analysis.

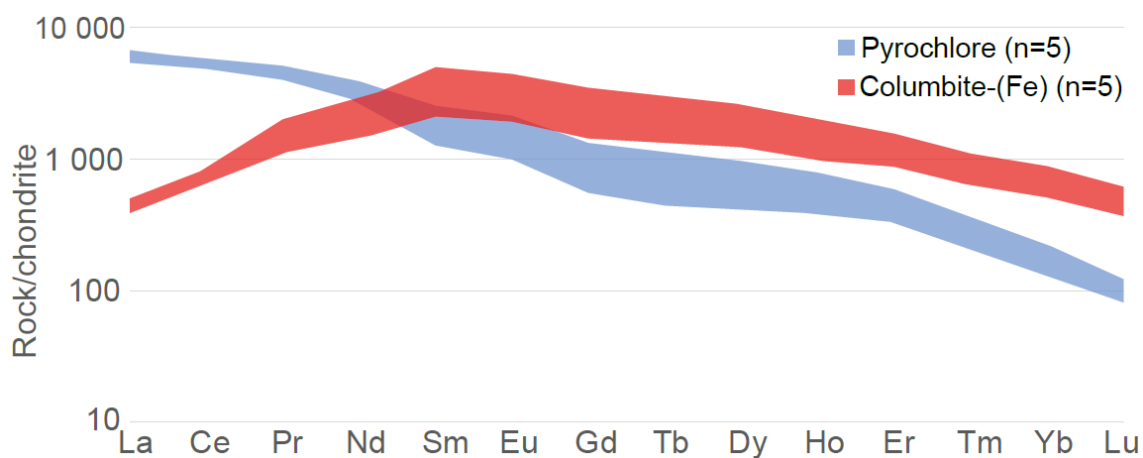


Figure 8: Chondrite-normalized REE contents in pyrochlore and columbite-(Fe) from the Saint-Honoré carbonatite. Columbite-(Fe) have a decreased content in LREEs, but is enriched in HREEs compared to pyrochlore. Data from LA-ICP-MS analysis.

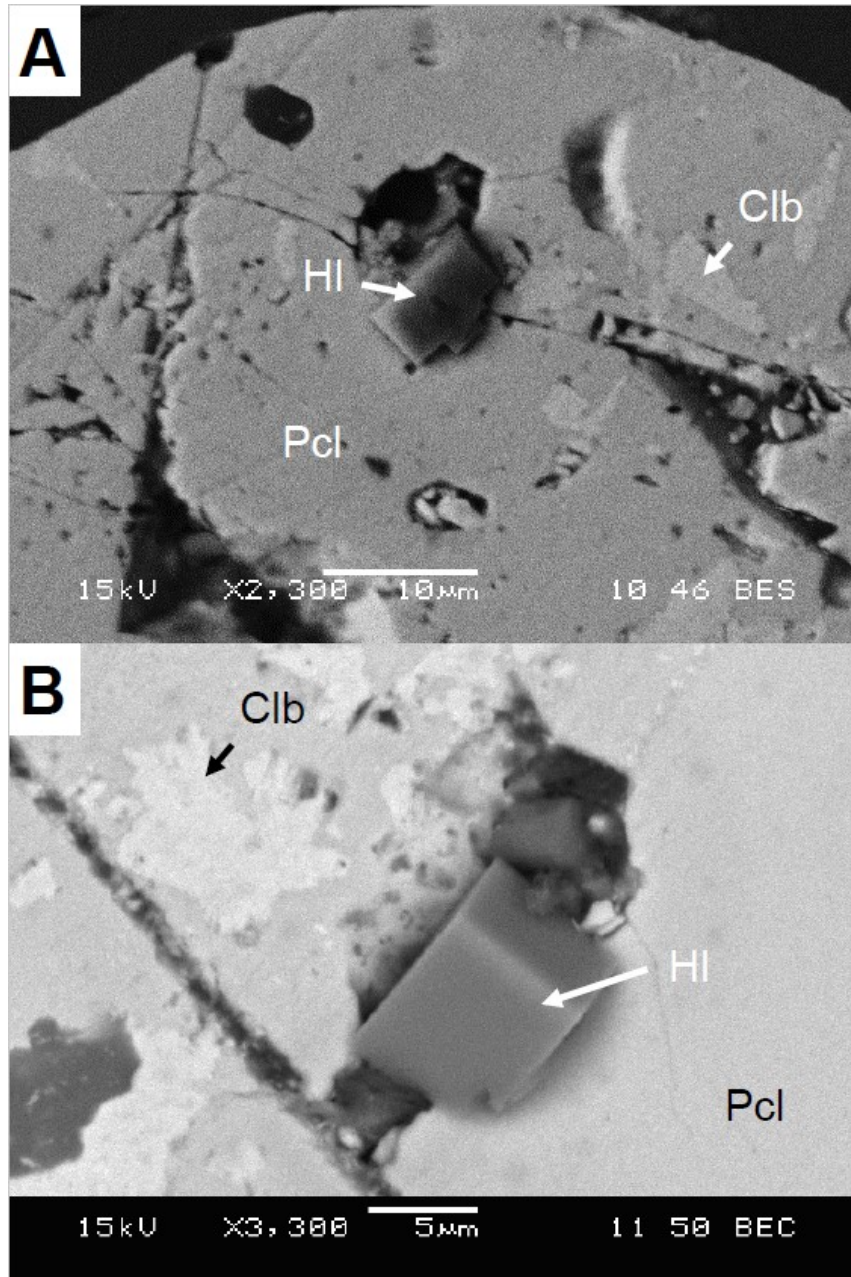


Figure 9: Microprobe (A) and SEM (B) images of halite (HI) grains in weakly altered pyrochlores (Pcl). Note that halite is crystallizing within pores. Halite was not observed in strongly altered pyrochlore or in columbite-(Fe). Clb: columbite-(Fe).



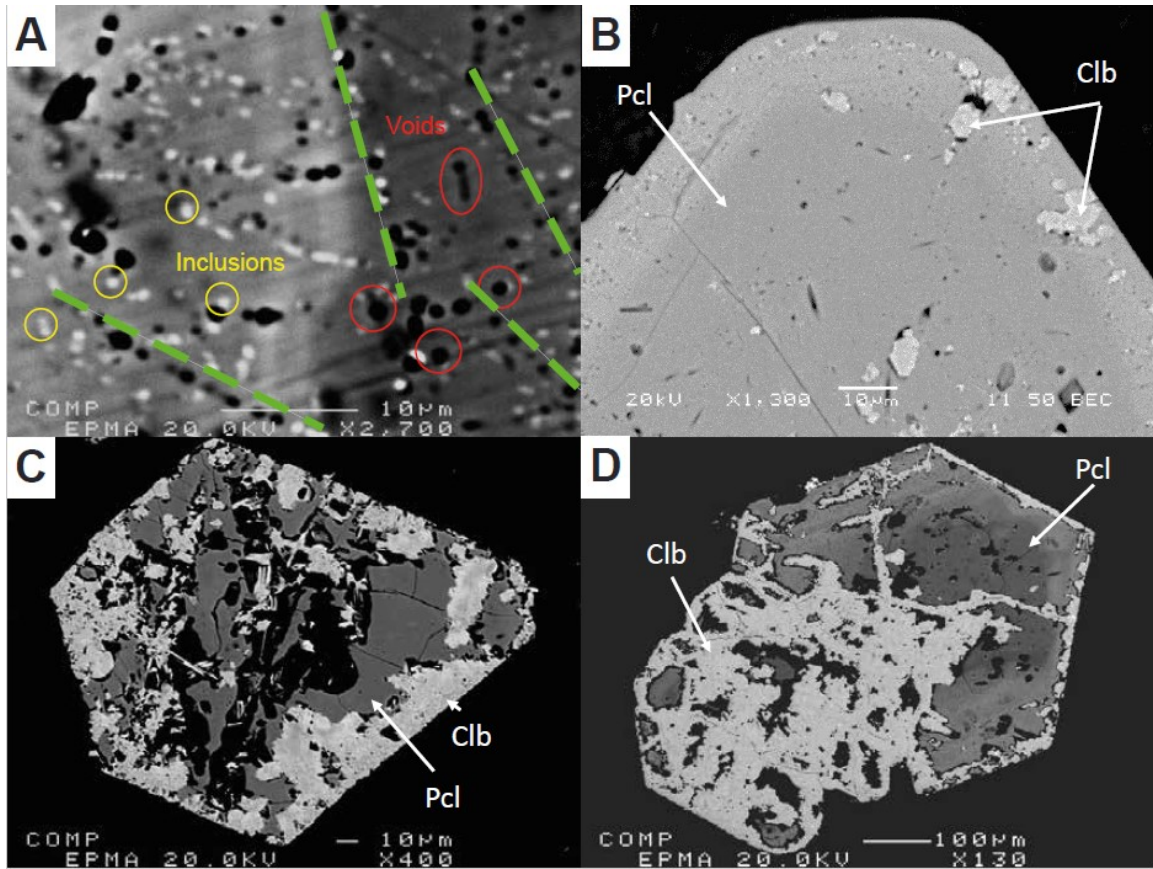


Figure 10: Stages of pyrochlore alteration. **A)** Microprobe image of microscopic pores in weakly altered pyrochlore (Pcl). **B)** SEM backscatter image of columbitization of a pyrochlore on grain margins. **C)** and **D)** microprobe images of pyrochlores altering into columbite-(Fe) (Clb) by fractures and grain margins.

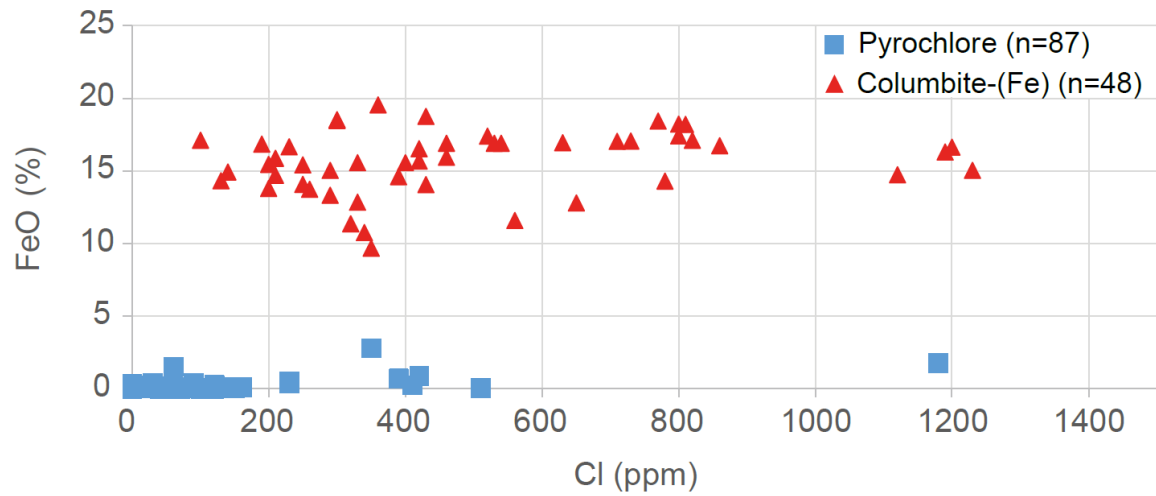


Figure 11: Microprobe results showing the relationship between %FeO/Cl (ppm) content of pyrochlore and columbite-(Fe) from the Saint-Honoré carbonatite. The iron content is used to discriminate the pyrochlore from columbite-(Fe).

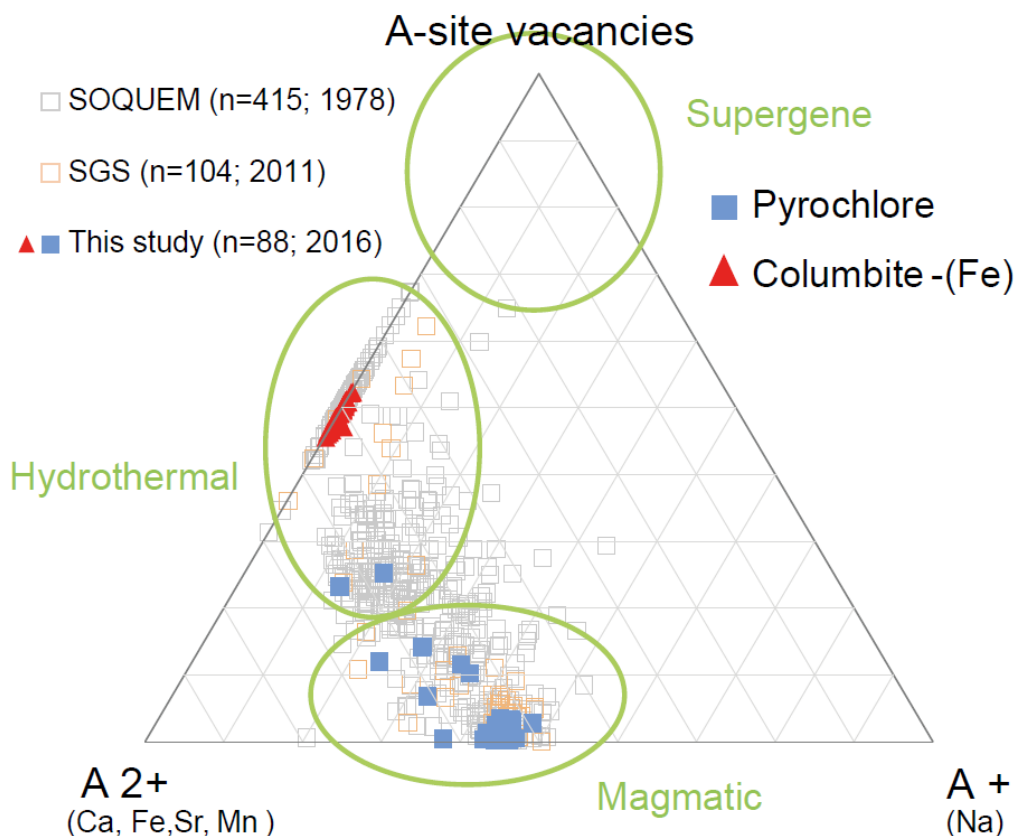


Figure 12: Representation of pyrochlore and columbite-(Fe) within a ternary diagram of major A-site cations (monovalent and divalent) and vacancies, based on 607 samples. Unaltered pyrochlores are distributed in the magmatic field whereas strongly altered pyrochlores and columbite-(Fe) are in the hydrothermal field.

Table 1: Representative major elements (Wt.%) of unaltered and altered fluorcalciopyrochlore from the Saint-Honoré carbonatite.

	Unaltered pyrochlore				Altered pyrochlore		
Wt. %	S11-C2-core	S01-C2	S07-C2	S07-C3	S21-C10	S05-C2-rim	S05-B
Na <sub>2</sub> O	7.549	7.274	7.952	7.956	0.031	0.033	0.035
CaO	16.503	16.973	16.162	16.372	4.833	9.229	7.013
SrO	0.690	0.769	0.868	0.864	0.049	0.015	0.062
FeO	0.012	n.d.	0.005	0.102	11.570	6.177	9.671
MnO	n.d.	n.d.	0.008	n.d.	3.585	1.657	2.907
ThO <sub>2</sub>	0.236	0.164	n.d.	0.049	0.289	0.217	0.132
UO <sub>2</sub>	0.010	n.d.	0.029	0.031	n.d.	n.d.	0.032
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.069	0.083	0.083	0.094	0.290	1.165	0.302
TiO <sub>2</sub>	2.036	2.827	1.197	1.595	2.304	4.553	2.182
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	n.d.	n.d.	n.d.	0.029	0.040	0.012	n.d.
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	69.840	67.697	71.525	70.472	75.896	70.588	75.678
Cl	n.d.	n.d.	0.010	0.008	0.056	0.051	0.035
F	2.753	3.023	3.242	3.348	0.090	n.d.	0.018
-O	1.159	1.273	1.365	1.410	0.038	n.d.	0.008
Total	98.539	97.537	99.716	99.514	98.995	93.697	98.059

Atoms per formula unit calculated on the basis of B=2 cations

Na	0.884	0.862	0.928	0.933	0.003	0.004	0.004
Ca	1.068	1.111	1.042	1.061	0.287	0.560	0.419
Sr	0.024	0.027	0.030	0.030	0.002	-	0.002
Fe <sup>2+</sup>	0.001	-	-	0.005	0.537	0.292	0.451
Mn	-	-	-	-	0.168	0.079	0.137
Th	0.003	0.002	-	0.001	0.004	0.003	0.002
U	-	-	-	-	-	-	-
Y	0.002	0.003	0.003	0.003	0.009	0.035	0.009
<b>ΣA</b>	1.983	2.005	2.004	2.034	1.010	0.973	1.024
Ti	0.092	0.130	0.054	0.073	0.096	0.194	0.092
Ta	-	-	-	-	0.001	-	-
Nb	1.908	1.870	1.946	1.927	1.903	1.806	1.908
<b>ΣB</b>	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Cl	-	-	0.001	0.001	0.005	0.005	0.003
F	0.526	0.584	0.617	0.640	0.016	-	0.003

Note: n.d. = not detected

Table 2: Representative major elements (Wt.%) of columbite-(Fe) from the Saint-Honoré carbonatite.

Wt.%	Columbite-(Fe)					
	005-C1	011-C3	S11-C1	N47-C1	N22-C3	S21-C3
Na <sub>2</sub> O	0.041	0.009	0.023	0.006	n.d.	n.d.
CaO	1.490	0.423	1.222	0.636	0.717	0.876
SrO	0.060	0.044	0.040	0.047	0.047	0.032
FeO	16.299	18.421	16.904	17.396	19.540	15.870
MnO	2.702	2.588	3.347	3.407	1.345	4.128
ThO <sub>2</sub>	0.639	0.700	0.453	0.725	0.463	0.130
UO <sub>2</sub>	n.d.	n.d.	0.024	n.d.	0.042	n.d.
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.648	0.235	0.111	0.230	0.209	0.191
TiO <sub>2</sub>	2.902	3.652	2.731	2.487	3.405	3.081
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.392	0.178	0.000	0.344	0.155	n.d.
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	71.714	72.228	73.620	71.089	72.570	74.180
Cl	0.119	0.077	0.046	0.052	0.036	0.021
F	-	0.038	-	0.070	-	-
-O	-	0.016	-	0.029	-	-
Total	97.006	98.577	98.521	96.460	98.529	98.509

Atoms per formula unit calculated on the basis of six oxygen atoms

Na	0.005	0.001	0.003	0.001	-	-
Ca	0.092	0.026	0.074	0.040	0.043	0.052
Sr	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001
Fe	0.785	0.869	0.800	0.853	0.923	0.740
Mn	0.132	0.124	0.160	0.169	0.064	0.195
Th	0.008	0.009	0.006	0.010	0.006	0.002
U	-	-	-	-	0.001	-
Y	0.020	0.007	0.003	0.007	0.006	0.006
<b>ΣA</b>	1.044	1.037	1.048	1.082	1.045	0.996
Ti	0.126	0.155	0.116	0.110	0.145	0.129
Ta	0.006	0.003	0.000	0.005	0.002	0.000
Nb	1.868	1.842	1.884	1.885	1.853	1.871
<b>ΣB</b>	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Cl	0.012	0.007	0.004	0.005	0.003	0.002
F	-	0.007	-	0.013	-	-

Note: n.d. = not detected

Table 3: Trace elements (in ppm) from fluorcalciopyrochlore and columbite-(Fe) samples collected from the Saint-Honoré carbonatite

-	Fluorcalciopyrochlore					Columbite-(Fe)				
	004-C4	004-C3	004-C3	004-C2	004-C1	021-C1	021-C2	021-C3	021-C4	021-C5
Cr	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1	151	328	250	215	42
V	122	75	68	65	74	15 960	19 490	19 560	18 490	18 780
Al	990	1 302	1 341	751	1 310	990	1 120	1 720	2 490	610
Si	2 060	2 090	2 360	3 140	2 480	2 100	1 390	2 590	2 930	926
K	123	92	82	126	44	96	67	108	134	66
Y	623	482	461	817	592	1 016	2 190	5 090	1 530	1 407
Zr	2 040	709	486	3 260	2 970	399	1 557	1 696	536	1 083
Th	12 480	15 340	15 560	13 690	10 450	922	1 849	1 977	1 469	2 115
U	87	95	81	98	248	256	301	253	355	196
Ta	238	325	300	312	629	321	415	435	233	455
Hf	66	30	23	119	106	20	57	66	22	42
La	1 309	1 567	1 589	1 408	1 277	106	92	87	113	324
Ce	3 124	3 376	3 490	3 433	2 974	471	512	546	477	783
Pr	422	451	462	474	371	104	169	208	149	205
Nd	1 503	1 530	1 582	1 780	1 258	652	1 268	1 681	1 003	1 280
Sm	284	257	265	375	188	311	738	1 360	511	540
Eu	89	78	81	120	56	108	249	512	166	179
Gd	189	163	168	263	110	286	691	1 560	476	457
Tb	29	24	24	40	16	47	106	274	77	64
Dy	171	137	138	237	102	302	641	1 650	480	370
Ho	32	25	25	43	21	53	108	274	82	62
Er	71	55	53	94	53	133	249	596	188	140
Tm	7	5	5	9	6	16	27	61	22	16
Yb	30	22	20	36	30	91	142	303	114	82
Lu	3	2	2	3	3	11	15	32	12	9

Note: n.d. = not detected

## CHAPITRE II

Ce chapitre n'est pas inclus dans l'article scientifique soumis à *Ore Geology Reviews*, mais est une partie intégrante du projet de Maîtrise. En effet, ce chapitre traite de la description minéralogique des différents types d'apatite observés lors de la pétrographie ainsi que de leur relation avec la minéralisation.

Succinctement, trois types d'apatite sont identifiés lors de la description de carottes ou de lames minces. Le premier type, nommé AP1, est l'apatite la plus commune dans la carbonatite de Saint-Honoré. Elle est blanchâtre avec une légère teinte verdâtre en mésoscopique et se caractérise sous le microscope par sa translucidité et sa forme subidiomorphe à idiomorphe. Sa taille varie entre quelques millimètres jusqu'à un centimètre. Cette apatite peut être disséminée dans la matrice carbonatée, mais se retrouve généralement sous forme de bandes associées aux autres minéraux accessoires, notamment la magnétite et la biotite. De plus, ces bandes sont reliées à la minéralisation en pyrochlore et en columbite-(Fe) (Fig. 6). Cette AP1 est décrite comme étant magmatique et ayant cristallisé en début de cycle avec le pyrochlore, tel que démontré par Jago and Gittins (1991) et souligné dans Tremblay et al. (ce mémoire). Brièvement, l'AP1 est considérée magmatique, car elle contient des teneurs considérables en fluor (Néron, données non publiées) et ses relations texturales avec le pyrochlore, notamment la présence d'inclusion d'apatite dans le pyrochlore, suggèrent une co-précipitation. De plus, la cathodoluminescence permet de cerner ses multiples zonations (Fig. 6). L'AP1 constitue donc un traceur important pour la minéralisation, mais ne permet pas de différencier les zones porteuses de pyrochlore ou de columbite-(Fe).



Le second type d'apatite (AP2) est d'une couleur orange vif sur les échantillons mésoscopiques et d'un orange moyen à foncé en lame mince. Cette apatite, contrairement à AP1, est finement grenue ( $< 0.1$  mm) et ne possède pas de forme cristalline observable au microscope due à sa taille réduite (Fig. 6). Cette apatite s'observe localement sous forme de veines selon une configuration aléatoire, mais souvent associée aux fractures. Les minéraux accessoires associés à cette apatite sont usuellement altérés, tel que la chloritisation des phlogopites. L'AP1 n'est toutefois pas altérée par l'AP2, mais bien au contraire, développe une auréole externe d'un blanc vif sous la cathodoluminescence (Fig. 6d). Il est à noter que cette bordure n'est pas visible sous la lumière polarisée. L'étude pétrographique a permis de cerner une relation intrinsèque entre la columbite-(Fe) et l'AP2. Ainsi, la présence d'AP2 ne signifie pas la présence de minéralisation, mais suggère autrement que la minéralisation associée à cette apatite soit de la columbite-(Fe). Tel que décrit dans Tremblay et al. (soumis), la columbite-(Fe) serait un produit d'altération du pyrochlore issu de l'hydrothermalisme et cette apatite, par association, serait elle aussi d'origine hydrothermale. Un argument en ce sens est la teneur significative en ETR lourdes qu'elles possèdent (Néron 2013, données non publiées), au même titre que la columbite-(Fe), des teneurs non observés dans le pyrochlore et ainsi provenant d'un enrichissement lors de l'altération. Ainsi, l'apatite orangée est recommandée comme traceur visuel lors de la description de carotte ou directement sous terre afin de cerner les zones porteuses de pyrochlore ou de columbite-(Fe). Une étude approfondie sur les éléments traces pourrait aussi permettre l'identification d'un traceur géochimique pouvant être utilisé, notamment par l'utilisation d'un XRF portatif.

Le troisième type d'apatite est peu abondant dans la portion dolomitique exploitée pour le Nb dans la carbonatite de Saint-Honoré. Il est principalement observé dans la portion ankéritique. Tout comme l'AP2, cette apatite possède une granulométrie difficile à cerner au microscope. Elle se distingue de l'AP2 par sa couleur rouge sang. Elle est distribuée aléatoirement sous forme de veines de quelques centimètres à 1 mètre. Elle est confondue avec l'hématite, un autre minéral présent dans la carbonatite. Puisque peu de lames minces possédaient ce type d'apatite et qu'aucune relation avec la minéralisation en niobium n'a pu être établie, l'étude de cette variété n'a pas été approfondie.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce présent mémoire présente les travaux sous forme d'un article arbitré soumis à un périodique scientifique : *Ore Geology Reviews*. Il présente les faits saillants de la recherche et les implications scientifiques et économiques. Avant la soumission au journal, l'article a été modifié et corrigé par L. Paul Bédard (directeur) et Guillaume Matton (codirecteur). L'anglais a été corrigé et amélioré par Services de révision Maxafeau (*Maxafeau Editing Services*). Les résumés de différents congrès et toute autre information pertinente se retrouvent en annexes.

Le projet a seulement traité de la portion minéralisée en Nb de la carbonatite de Saint-Honoré, ce qui correspond aux roches dolomitiques et les passages calcitiques qui les recoupent. Les roches ankéritiques reconnues pour leur minéralisation en ETR et l'unité calcitique externe de la carbonatite n'ont donc pas été étudiées. La majeure partie du projet a été consacrée à l'étude pétrographique des relations texturales et structurales des minéraux porteurs de Nb. Les objectifs primaires étaient d'identifier les principaux minéraux porteurs de Nb et d'expliquer leur pétrogenèse et leur relation minéralogique avec la matrice et les minéraux accessoires. Trois minéraux porteurs de Nb ont ainsi été identifiés : le fluorcalciopyrochlore, le « pyrochlore-(Fe) » et la columbite-(Fe). Ils se retrouvent principalement dans les roches dolomitiques. Quelques lentilles minéralisées se retrouvent aussi dans les passages calcitiques, mais sont en moindre quantité. Le pyrochlore et la columbite-(Fe) se retrouvent disséminés dans la matrice et représentent un bruit de fond non économique, mais se retrouvent en amas exploitables lorsqu'associés avec l'apatite magmatique (AP1). La phlogopite et la magnétite sont deux minéraux accessoires

très fréquemment associés aux horizons minéralisés, mais ne constituent pas des traceurs de la minéralisation au même titre de l'apatite. Les textures suggèrent que le pyrochlore et l'apatite (AP1) aient cristallisé simultanément, expliquant par le fait même leur concentration en F et en ETR légères.

Les propriétés visuelles des minéraux porteurs de Nb ont montré que le fluorcalciopyrochlore est généralement hypidiomorphe à idiomorphe, sans inclusion et d'une couleur verdâtre à brunâtre. La columbite-(Fe), au contraire, est de forme irrégulière, très noire et possède de nombreuses inclusions. Le « pyrochlore-(Fe) » est un stade intermédiaire aux propriétés variables selon les lames minces étudiées. La disparité des propriétés de ces minéraux couplée au degré d'altération des minéraux associés (apatite, phlogopite, carbonates) a permis d'identifier la columbite-(Fe) comme étant un produit d'altération du fluorcalciopyrochlore. Le « pyrochlore-(Fe) », une variété de pyrochlore non reconnue selon la classification officielle (Atencio et al. 2010), est en fait un stade intermédiaire d'altération, une solution solide de deux minéraux.

L'altération du pyrochlore en columbite-(Fe), la columbitisation, a été documentée il y a plus de 50 ans (James and McKie 1958), mais les évidences pétrographiques étaient lacunaires. Puisque la carbonatite de Saint-Honoré est accessible à plus de 2100' (~650m) et s'est formé dans un cadre géodynamique post-grenvillien, elle n'est pas sujette à l'altération superficielle et est ni déformée, ni métamorphisée. Les signes de columbitisation sont donc bien conservés. L'altération en columbite-(Fe) s'effectue aux marges des grains de pyrochlores ou par les faiblesses cristallines sous forme de veinules. Les vides laissés par l'altération sont remplacés par des inclusions de calcite et de fluorite. Ces inclusions sont formées à la suite du lessivage des éléments des sites A et Y du

pyrochlore, soient le Ca, le Na et le F. Les traces en ETR légères sont aussi lessivées et pourraient contribuer à la formation de minéraux de terres rares (bastnäsité et monazite) en périphérie des pyrochlores altérés.

L'utilisation d'un diagramme ternaire (Lumpkin and Ewing 1995) des éléments lessivés du site A permet d'identifier l'altération comme étant hydrothermale. Un enrichissement en Cl et en ETR lourdes dans les grains de columbite-(Fe) contribuent à l'hypothèse de l'hydrothermalisme, car le Cl est généralement observé dans les fluides tardifs tandis que les concentrations en ETR lourdes sont aussi observées dans les roches ankéritiques où l'altération hydrothermale a été démontrée (Néron et al. 2013). Les ETR lourdes sont aussi observées dans la fine apatite orange (AP2) qui est généralement associée à la columbite-(Fe). Cette apatite peut être utilisée comme traceur hydrothermal. De plus, l'on observe aussi une perte en ETR légères lors de l'altération du pyrochlore en columbite-(Fe). Cet appauvrissement peut être expliqué par la forte incompatibilité des ETR légères comparativement à celles des ETR lourdes, simplifiant le lessivage de ces éléments lors de l'altération.

Le dernier point traité dans le cadre du projet est le lessivage du Na lors de l'altération du pyrochlore. Le Na est très mobile et n'était pas observé sous forme minérale dans les inclusions de columbite-(Fe) au même titre que le Ca (calcite) et le F (fluorite). Par contre, l'enrichissement en Cl a mené une piste sur la formation de halite dans le gisement. La confection de lames minces avec un lubrifiant sans eau a permis d'observer des grains de halite (5-10  $\mu\text{m}$ ) dans les cavités des pyrochlores légèrement altérés. Cela implique la halite serait d'origine magmato-hydrothermale; le Na est magmatique et provient du lessivage du pyrochlore tandis que le Cl est secondaire et est issu du fluide hydrothermal.

Lorsque les grains de pyrochlore subissent davantage l'effet de l'altération, les petits grains de halite sont dissous et expulsés du pyrochlore. Ils sont alors précipités en remplissage de fractures. Le bilan de masse ne permet pas de conclure que l'entière du Na nécessaire pour produire la quantité de halite observée dans le complexe alcalin provienne de l'altération du pyrochlore, mais contribue significativement.

Finalement, le projet de recherche a permis d'identifier et de caractériser la columbitisation dans une carbonatite non métamorphisée et exempte d'altération météoritique ou de latérisation. Ceci permet une meilleure compréhension de l'association du pyrochlore avec l'apatite (AP1). La portée du projet a aussi des incidences économiques importantes. La columbite-(Fe) est désormais reconnue comme un minéral important au même titre que le fluorcalciopyrochlore dans la carbonatite de Saint-Honoré. Plus de 65% de la minéralisation est issue du pyrochlore et 35% provient de la columbite-(Fe). Afin de bonifier la récupération du Nb, il est suggéré de produire une seconde ligne de traitement optimisée pour la géométallurgie de la columbite-(Fe). Afin de différencier les galeries riches en Pcl ou en Clb-(Fe), il est recommandé de tracer l'hydrothermalisme par la présence de l'apatite orange (AP2). Ceci puisqu'il est très difficile de différencier le pyrochlore de la columbite-(Fe) lors de la description de carottes et que l'analyse chimique ne donne qu'une analyse totale en  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ .

## RÉFÉRENCES

- Atencio, D., Andrade, M.B., Christy, A.G., Gieré, R., and Kartashov, P.M. 2010. The pyrochlore supergroup of minerals: Nomenclature. *The Canadian Mineralogist*, **48**: 673-698.
- Anglo American. 2016. Anglo American agrees \$1.5 billion sale of niobium and phosphates businesses [en ligne]. Disponible à <http://www.angloamerican.com/media/press-releases/2016/28-04-2016> [cité le 26 octobre 2016].
- Castor, S.B. 2008. The Mountain Pass rare-earth carbonatite and associated ultrapotassic rocks, California. *Canadian Mineralogist*, **46**: 779-806.
- CBMM. 2013. Operations [en ligne]. Disponible à <http://www.cbmm.com.br/en/Pages/operations.aspx> [cité le 26 octobre 2016].
- Chao, E.C.T., Back, J., and Minkin, J.A. 1992. Host-rock controlled epigenetic, hydrothermal metasomatic origin of the Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit, Inner Mongolia, PRC. *Applied Geochemistry*, **7**: 443-458.
- Hogarth, D.D., Williams, C.T., and Jones, P. 2000. Primary zoning in pyrochlore group minerals from carbonatites. *Mineralogical Magazine*, **64**: 683-697.
- Iamgold Corp. 2012. Niobium 101 [En ligne]. Disponible à <http://www.iamgold.com/French/Exploitations/Mines-en-exploitation/Mine-de-niobium-Niobec-Qubec/Niobium101/default.aspx> [cité le 29 novembre 2014].
- Jago, B.B., and Gittins, J. 1991. The role of fluorine in carbonatite magma evolution. *Nature*, **349**: 56-58.
- James, T.C., and McKie, D. 1958. The alteration of pyrochlore to columbite in carbonatites in Tanganyika. *Journal of the Mineralogical Society*, **31**: 889-902.
- Knudsen, C. 1989. Pyrochlore group minerals from the Qaqarssuk carbonatite complex. *Dans Lanthanides, Tantalum and Niobium. Sous la supervision de P. Möller, P. Cerný et F.*

Saupé. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg. p. 80-99.

Lumpkin, G.R., and Ewing, R.C. 1995. Geochemical alteration of pyrochlore group minerals: Pyrochlore subgroup. *American Mineralogist*, **80**: 732-743.

Mariano, A.N. 1989. Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks. *Dans Carbonatites: genesis and evolution. Sous la supervision de K. Bell. Unwin Hyman.* p. 149-176.

Mitchell, R.H., and Kjarsgaard, B.A. 2004. Solubility of niobium in the system  $\text{CaCO}_3\text{-CaF}_2\text{-NaNbO}_3$  at 0.1 GPa pressure: implications for the crystallization of pyrochlore from carbonatite magma. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **148**: 281-287.

Nasraoui, M., and Bilal, E. 2000. Pyrochlores from the Lueshe carbonatite complex (Democratic Republic of Congo): a geochemical record of different alteration stages. *Journal of Asian Earth Sciences*, **18**: 237-251.

Néron, A., 2015. Caractérisation de la minéralisation de la zone à terres rares de la carbonatite de Saint-Honoré, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise ès sciences, Département des sciences appliquées, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Québec.

Néron, A., Bédard, L.P., Gaboury, D., and Thivierge, S. 2013. Preliminary characterization of the REE mineralization of the St-Honoré ferro-carbonatite (Québec, Canada). 12<sup>th</sup> Society for Geology Applied to Mineral Deposits (SGA) biennial meeting, Uppsala Sweden.

USGS. 2017. Niobium (Columbium) [en ligne]. Disponible à <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/mcs-2017-niobi.pdf> [cité le 20 juin 2017].

Roskill. 2016. Niobium: Markets outlook to 2017, 12th edition [en ligne]. Disponible à <https://roskill.com/product/niobium-market-outlook-2017/> [cité le 26 octobre 2016].

Simandl, G. 2014. Geology and market-dependent significance of rare earth element



resources. *Mineralium Deposita*, **49**: 889-904.

Tremblay, J., Bédard, L.P., and Matton, G. *Soumis*. Columbitization of fluorcalciopyrochlore by hydrothermalism at the Saint-Honoré alkaline complex, Québec (Canada): new insights on halite in carbonatites. *Soumis le 18 avril 2017 à Ore Geology Reviews*

Wall, F., Williams, C.T., and Woolley, A.R. 1996. Pyrochlore from weathered carbonatite at Lueshe, Zaire. *Mineralogical Magazine*, **60**: 731-750.

Zurevinski, S.E., and Mitchell, R.H. 2004. Extreme compositional variation of pyrochlore-group minerals at the Oka carbonatite complex, Quebec: Evidence of magma mixing?. *The Canadian Mineralogist*, **42**: 1159-1168.

## ANNEXE 1

Résumé présenté au Symposium sur les matériaux critiques et stratégiques (Symposium on Strategic and Critical Materials), Victoria, Colombie-Britannique, 13-14 novembre 2015.

### **A petrographic study of Nb-bearing minerals at the Saint-Honoré niobium deposit**

J. Tremblay<sup>1,a</sup>, L.P. Bédard<sup>1</sup>, and G. Matton<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sciences de la Terre, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Québec

<sup>2</sup> Niobec Inc., Saint-Honoré-de-Chicoutimi, Québec

<sup>a</sup> Corresponding author: [jonathan.tremblay11@uqac.ca](mailto:jonathan.tremblay11@uqac.ca)

La version numérique de l'ouvrage tiré du recueil officiel du Symposium se retrouve à l'adresse suivante. En partenariat avec la Commission Géologique de la Colombie-Britannique. Un poster a été présenté lors du congrès.

<http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Geoscience/PublicationsCatalogue/Papers/Documents/P2015-3/09%20Tremblay.pdf>

## ANNEXE 2

Résumé dans le cadre de la Journée des Sciences de la Terre et de l'Environnement (JSTE) organisée par l'INRS. Présentation orale. Gagnant du prix « Choix du jury » pour la qualité de la présentation orale.

### **Évidences pétrographiques de la transformation du pyrochlore en columbite dans la carbonatite de Saint-Honoré, Saguenay**

Tremblay, J.<sup>a</sup>, Bédard, L.P.<sup>a</sup>, Matton, G.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Sciences de la Terre, Université du Québec à Chicoutimi

<sup>b</sup> Mine Niobec inc., Saint-Honoré, Saguenay

Le complexe alcalin de Saint-Honoré est exploité par Mine Niobec inc. depuis plus de 40 ans pour le pyrochlore  $[(Ca,Na)_2(Nb,Ti)_2O_6(O,OH,F)]$ . Avec l'avancé de l'exploitation, une plus grande abondance de columbite-(Fe)  $[(Fe,Mn)(Nb,Ti)_2O_6]$  est observée. Ce minéral autrefois considéré comme une phase mineure dans la carbonatite prend plus d'importance.

Les grains de pyrochlore et de columbite-(Fe) sont de taille variable, mais ils sont généralement assez grossiers pour être observés à la loupe. Sous le microscope polarisant, les grains de pyrochlores sont généralement idiomorphes, ont rarement des inclusions et plusieurs présentent une zonation. La columbite-(Fe), au contraire, est xéno- à hypidiomorphe et possède de multiples inclusions. Les deux minéraux sont associés à des bandes d'apatite. Toutefois, le pyrochlore et la columbite-(Fe) s'observent que très rarement dans les mêmes bandes d'apatite. Les observations en lames minces indiquent que le pyrochlore correspond à 65% de la minéralisation tandis que la columbite-(Fe) représente environ 30%. La balance des minéraux inclut d'autres phases mineures et ponctuelles. La cathodoluminescence et la microscopie électronique à balayage (MEB) ont permis d'identifier les inclusions de la columbite-(Fe) comme des grains de calcite  $[CaCO_3]$  et de fluorite  $[CaF_2]$ . L'analyse au MEB a aussi montré plusieurs grains montrant différents stades de transformation du pyrochlore en columbite-(Fe).

Il est suggéré que le pyrochlore se transforme sous certaines contraintes hydrothermales ou magmatiques libérant ainsi le Ca, Na et le F qui produisent des inclusions à l'intérieur du grain de columbite-(Fe). Ceci serait causé par un déséquilibre du pyrochlore et par l'incorporation de Fe. Les conditions responsables de cette transformation sont actuellement à l'étude.

Mots clés : carbonatite, niobium, pyrochlore, columbite, Saint-Honoré

## ANNEXE 3

Résumé dans le cadre du congrès annuel Goldschmidt 2016, Yokohama, Japon, 26 juin-1 juillet. Présentation orale.

### **Evidence of a transformation from pyrochlore into columbite-(Fe) at the Saint-Honoré carbonatite, Québec (Canada)**

J. TREMBLAY<sup>1\*</sup>, L.P. BÉDARD<sup>1</sup> AND G. MATTON<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université du Québec à Chicoutimi, Québec, Canada (\*correspondence: Jonathan.Tremblay11@uqac.ca)

<sup>2</sup>Niobec inc., Québec, Canada

#### **Overview**

The Saint-Honoré carbonatite is located in the Saguenay region of Québec, Canada. The carbonatite is enclosed within the central part of an alkaline complex and is characterized by calcite rocks in its external portion and dolomite and ankerite towards its core [1]. It has been exploited for niobium through underground mining since 1976. Nb-bearing minerals are found predominantly within the dolomitic and calcitic units.

Historically, niobium was mainly extracted from fluornatropyrochlore  $[(Ca,Na)_2(Nb,Ti)_2O_6(O,OH,F)]$  (Pcl) with a minor contribution from columbite-(Fe)  $[(Fe,Mn)(Nb,Ti)_2O_6]$  (Clb). However, the abundance of columbite-(Fe) increases as exploitation of the deposit progresses. Pcl grains are euhedral, often zoned, and generally inclusion-free. Most Clb grains are anhedral, show no zoning, may be fractured, and have many inclusions of calcite and fluorite. Both minerals are observed within apatite-rich bands. However, unaffected Pcl and Pcl transforming into Clb are rarely observed together in the same apatite bands.

#### **Evidence of transformation**

The alteration of pyrochlore into columbite within carbonatites was first studied in 1958 [2]. This transformation involves the addition of Fe and Mn and the removal of Ca, Na, and F. Most Clb grains from the Saint-Honoré carbonatite show a similar texture and have calcite and fluorite inclusions. Pcl grains at different stages of transformation into Clb were observed and analyzed by SEM-EDS. Alteration occurs initially along grain margins or within fractures. Pcl grains associated with a transformation into Clb have a mineral chemistry typical of hydrothermal alteration.

[1] Thivierge *et al.* (1983) *Min. Dep.* **18**, 267–283. [2] James & McKie (1958) *Min. Mag.* **31**, 889–902.

## ANNEXE 4

Résumé dans le cadre du congrès annuel Québec Mines, Québec, 21 au 24 novembre 2016.

Présentation d'un poster. Gagnant du second prix au concours de l'AQUEST, division 2<sup>e</sup> cycle, pour la présentation orale de l'affiche.

### **La carbonatite de Saint-Honoré : columbitisation, enrichissement géochimique et formation de halite**

**Auteurs :** Jonathan Tremblay (UQAC), L.Paul Bédard (UQAC), Guillaume Matton (Niobec)

UQAC : Sciences de la Terre, Université du Québec à Chicoutimi

Plusieurs minéraux porteurs de Nb ont été identifiés dans la carbonatite de Saint-Honoré, incluant 5 variétés de pyrochlores (Belzile 2009). Quoique tous exploités, seuls deux minéraux représentent la majorité: le fluorcalciopyrochlore  $[(Ca,Na)_2(Nb,Ti)_2O_6(O,OH,F)]$  (pcl) et la columbite-(Fe)  $[(Fe,Mn)(Nb,Ti)_2O_6]$  (clb). La columbite-(Fe) était autrefois une phase mineure, mais augmente graduellement en profondeur et vers le nord de la mine. Sa proportion est passée de 5% à ~35% sur moins de 600m de profondeur et sa présence peut influencer la récupération du Nb.

L'étude des minéraux a montré que la columbite-(Fe) est un produit d'altération du pyrochlore (James and McKie 1958) peu étudié. L'altération se caractérise par un lessivage des éléments (Ca, Sr, Na, et ETR) du site A et du fluor du site Y du pyrochlore ainsi qu'un remplacement subséquent par du Fe et du Mn. La pétrographie au microscope polarisant et à la cathodoluminescence montre effectivement des inclusions de calcite et de fluorite à l'intérieur de la columbite-(Fe). Le microscope électronique à balayage a permis d'identifier des grains de pyrochlore en processus d'altération. La stœchiométrie du site A des pyrochlores dans un diagramme ternaire (Lumpkin and Ewing 1995) montre une altération d'origine hydrothermale. Les données en LA-ICP-MS révèlent un enrichissement en Cl et en ETR lourdes dans les columbites-(Fe) suggérant un fluide hydrothermal riche en ETR lourdes.

L'enrichissement en Cl provenant du fluide tardif pourrait expliquer la présence de chlorures dans la carbonatite. Il est notamment suggéré que le Na lessivé du pyrochlore contribue à la formation de halite. En effet, le Na, très mobile, est lessivé en premier lors de l'altération du pyrochlore. Des grains de halite de moins de 10µm ont été observés dans les cavités de pyrochlores faiblement altérés. Autrement, elle s'observe en remplissage de fractures sur quelques centimètres d'épais par endroits. De plus, ce sodium libéré pourrait contribuer à la fénitisation des encaissants.

Les relations minéralogiques ont permis de cerner une association intrinsèque entre la columbite-(Fe) et une apatite orangée. Si cette apatite s'avère d'origine hydrothermale, elle pourrait servir de traceur géologique de la columbite-(Fe).

**Réf :** Belzile, E., 2009. NI 43-101 Technical report for Niobec Mine, Quebec, Canada, February 2009. IAMGOLD Corporation, 104p.

James, T.C., and McKie, D., 1958. The alteration of pyrochlore to columbite in carbonatites in Tanganyika. *Journal of the Mineralogical Society*, 31, 889-902.

Lumpkin, G.R., and Ewing, R.C., 1995. Geochemical alteration of pyrochlore group minerals: Pyrochlore subgroup. *American Mineralogist*, 80, 732-743.

## ANNEXE 5

Résumé dans le cadre du congrès SGA (Society for Geology Applied to Mineral Deposits),  
Québec, 20-23 août 2017. Présentation d'un poster.

# Halite at the Saint-Honoré carbonatite: an insight into a magmatohydrothermal process

**Jonathan Tremblay, L Paul Bédard**  
*Université du Québec à Chicoutimi*

**Guillaume Matton**  
*Mine Niobec inc.*

Halite is a ubiquitous mineral in the Saint-Honoré carbonatite (Saguenay, Québec, Canada). It has remained present within the deposit as the deeper carbonatite has not been weathered. Halite is either disseminated or occurs as veinlets throughout the dolomitic unit associated with Nb mineralization. It is also found in pores of weakly to moderately altered pyrochlore crystals. The two main Nb-bearing minerals, fluorcalciopyrochlore and columbite-(Fe), are related through hydrothermal alteration (columbitization). Sodium is from pyrochlore (magmatic) whereas Cl is from hydrothermal fluid as there is no significant Cl in any mineral, except columbite-(Fe), which is hydrothermal. These interpretations suggest that halite has a hybrid magmatohydrothermal origin. The role of Cl to the transport of REEs and the contribution of columbitization in the fenitization of the host rocks are investigated.

## 1 Introduction

Oldoinyo Lengai has been intensely studied as it is the only known active carbonatite volcano having sodium carbonate lavas (Mangler et al. 2014). Studies of this volcano have raised numerous questions about the presence of sodium in carbonatites and the implication for its genesis, one question in particular being the origin of halite in carbonatites. Halite is observed in the groundmass of Oldoinyo Lengai lavas (Zaitsev and Keller 2006) but its origin and, more precisely, the reason for the presence of chlorine remains unclear.

The Saint-Honoré carbonatite offers an ideal

location to study the presence of halite in carbonatites. Halite is a ubiquitous mineral in the carbonatite. Moreover, the carbonatite has not been affected by metamorphism, nor it is deformed, and it is accessible to roughly 800 metres in depth, thereby preserving it from weathering.

This communication focuses on the presence of halite in the Saint-Honoré carbonatite, its petrographic distribution as well as its origin.

## 2 Geology

### 2.1 Regional geology

The Saint-Honoré carbonatite is part of an alkaline complex of 10 km<sup>2</sup>, located near the city of Saguenay, Québec, Canada. The complex is surrounded by Mesoproterozoic Grenvillian fenitized gneiss and diorite with an upper amphibolite and lower granulite metamorphic facies (Dimroth et al. 1981; Higgins and van Breemen 1996). The alkaline magmatism is referred to as the Iapetan rift and is related to the St-Lawrence River rift activity (Kumarapeli and Saul 1966).

Alkaline silicate rocks associated with the carbonatite are characterized by nepheline-bearing syenites and foidolites. Baddeleyite from a lamprophyre dyke related to the alkaline complex yielded a U-Pb age of 582.1±1.8 Ma (Michael Higgins, personal communication, 2015).

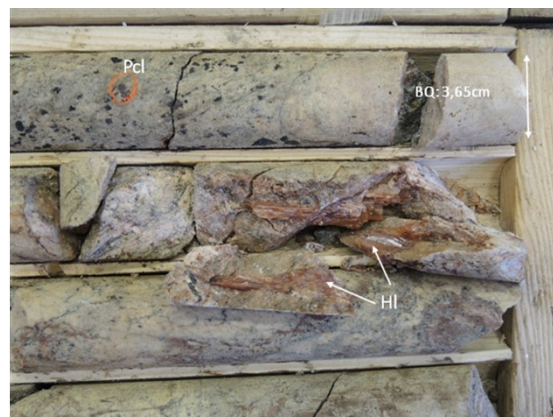
## 2.2 Carbonatite

The Saint-Honoré carbonatite is composed of concentric subvertical layers of carbonates with variable compositions (Fortin-Bélanger 1977; Thivierge et al. 1983). The outer part of the carbonatite is a sövite (calcio-carbonatite) that is barren of any mineralization and has been only poorly documented. The core of the carbonatite displays ankeritic breccias and is enriched in LREEs (Fournier 1993; Grenier et al. 2013; Néron 2015). A dolomitic unit (magnesian-carbonatite) lies between the calcio- and ferro-carbonatite and hosts the Nb mineralization.

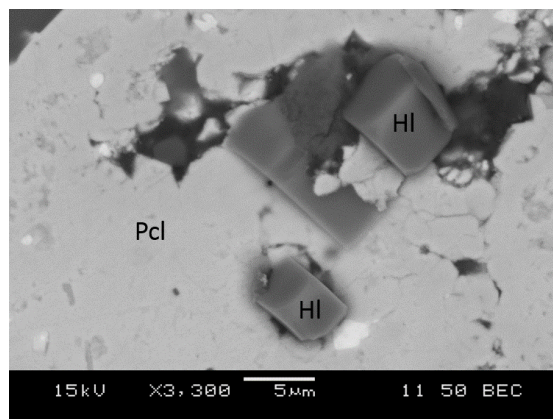
The dolomitic rocks have been the best studied portion of the carbonatite as they have been drilled for exploration and exploitation. The dolomitic rocks are characterized by medium-grained hypidiomorphic dolomite grains with no apparent cleavage. Accessory minerals are columbite-(Fe), fluorcalciopyrochlore, phlogopite, magnetite, pyrite, and various types of apatite. There are also minor traces of ilmenite, hematite, sphalerite, chlorite, quartz, zircon, baddeleyite, barite, and REE minerals throughout the unit. Accessory and trace minerals are generally disseminated, but may occur as lenses. There is a pervasive alteration affecting dolomite and accessory minerals, leaving a grey aspect to carbonates and alter phlogopite into chlorite.

## 3 Halite

Halite concentrations in the Saint-Honoré carbonatite are surprisingly high. Halite is observed as veins, varying from a few millimetres to a decimetre in width (Fig. 1). It is mainly observed in the dolomitic rocks where the Nb mineralization is economically viable. In the dolomitic unit of the carbonatite, except for halite and pyrochlore, no other mineral has a significant Na content. Thin sections were prepared using a water-free lubricant to preserve chlorides. Halite was not observed as inclusions in apatite or phlogopite. It was observed in pores of weakly to moderately altered pyrochlore (Fig. 2), but never in fresh pyrochlore.



**Figure 1.** Halite (HI) crystallized as veinlets and observed in core samples. In some cases it is conserved during drilling, but most halite is usually dissolved during drilling and logging. The core diameter is 3.65 cm.



**Figure 2.** Halite (HI) grains crystallized in pores of a moderately altered pyrochlore (Pcl). Grains of halite are roughly less than 10 µm. This backscattered electron (BSE) image was obtained by SEM analysis.

## 4 Pyrochlore, a source of sodium

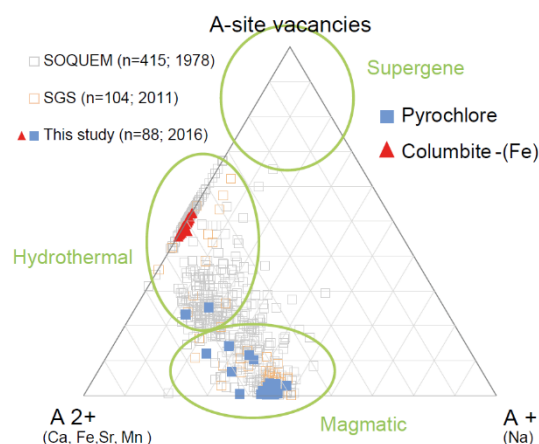
To better understand the presence of halite in the carbonatite, we studied the mineral assemblages of the carbonatite (Tremblay et al., in preparation). Pyrochlore and columbite-(Fe) of the dolomitic unit are interpreted to be related by columbitization, an alteration process first described by James and McKie (1958) in the Tanganyika carbonatite. The alteration process releases Na, a major cation in pyrochlore (Lumpkin and Ewing 1995). Considering that the proportion of columbite-(Fe) slowly increases with depth, the quantity of leached Na is also expected to increase. Microprobe analyses of pyrochlore and columbite-(Fe) grains show that Cl is higher in columbite-(Fe) compared to fresh (unaltered) pyrochlore. Apatite and phlogopite



associated with mineralization have Cl concentrations below detection limits.

## 5 Columbitization by hydrothermalism

The origin of pyrochlore alteration can be determined using a ternary diagram of the relative proportions of monovalent (Na), divalent cations (Ca, Sr, Fe<sup>2+</sup> and Mn), and vacancies in pyrochlore (Lumpkin and Ewing 1995; Nasraoui and Bilal 2000; Zurevinski and Mitchell 2004). Based on microprobe results from this study and historical values (Tremblay et al., in preparation), the alteration trend is clearly hydrothermal (Fig. 3).



**Figure 3.** Ternary diagram of monovalent and divalent cations and vacancy of pyrochlore (based on Lumpkin and Ewing 1995) from the Saint-Honoré carbonatite. Although the diagram is not designed to plot columbite-(Fe), its position fits well with the hydrothermal field.

## 6 Discussion

The presence of halite, and therefore Na and Cl, raises questions regarding its contribution to the transport of economic elements and the origin of Na and Cl in carbonatites. Na is without doubt magmatic in the Saint-Honoré carbonatite, as it is a major constituent of fluorcalciopyrochlore (up to 8% Na<sub>2</sub>O), one of the first minerals along with apatite to crystallize in a carbonatitic magma (Hogarth et al. 2000; Knudsen 1989). The strong relationship of pyrochlore to apatite and textural evidence argue for its magmatic origin.

The origin of Cl is, however, enigmatic. Based on the spatial distribution of halite in and around magmatic minerals from the Saint-Honoré carbonatite, Kamenetsky et al. (2015) proposed halite, and therefore Cl, to be mantle-derived.

However, the study of the Nb-bearing minerals of the carbonatite suggests a slightly different interpretation of the petrogenesis of halite.

Petrographic observations and geochemical analysis of pyrochlore and columbite-(Fe) have shown that Na was leached during alteration, whereas Cl was related to hydrothermal fluids. Thus, the Na is considered as magmatic in origin and Cl as being hydrothermal (Tremblay et al., in preparation). Our results show that the halite is not entirely magmatic, as argued by Kamenetsky et al. (2015), but rather magmatohydrothermal. The absence of Cl in other magmatic minerals (e.g., apatite and phlogopite) reinforces this idea of a non-igneous origin.

A mass balance exercise was applied to determine if the alteration of pyrochlore was an important source of Na. Pyrochlore accounted for only approximately 15% of total halite. However, the proportion of halite is uncertain due to its high solubility, and pyrochlore is mostly distributed as lenses and, therefore, its realistic proportion becomes difficult to estimate. Moreover, the deposit is open at depth and the proportion of pyrochlore might be higher at greater depths, suggesting that the input of Na from pyrochlore could have been even more substantial. Nevertheless, the alteration of pyrochlore contributed significantly to the formation of halite. It might be possible that this Na also contributed to the fenitization of the host rocks. This alteration is characteristic of alkaline rocks and more specifically to carbonatites. Silicate rocks are not in equilibrium with a carbonatitic magma and are probably less resilient to a salt-bearing hydrothermal fluid.

## 7 Conclusion

Halite, an enigmatic mineral in carbonatites, has one clear source: pyrochlore. Although alteration of pyrochlore is not the sole source, it contributes significantly to the total amount of halite. Furthermore, the presence of halite, and thus Cl, could have significantly increased the solubility of light rare earth elements (Migdisov and Williams-Jones 2014) and even Nb during magmatism and hydrothermalism. Halite would then be only a remnant of the transportation and/or concentration processes of Nb and REE mineralization in carbonatites.

## Acknowledgements

This work is supported by a NSERC grant to LPB. J Tremblay thanks Niobec Mine Inc. for

their ongoing support and the access to samples. The UQAC Foundation and DIVEX are also thanked for scholarship funds to J Tremblay. The extended abstract was corrected by Murray Hay (Maxafeau Editing Services).

## References

- Dimroth E, Woussen G, Roy, DW (1981) Geologic history of the Saguenay Region, Quebec (Central Granulite Terrain of the Grenville Province): a working hypothesis. *Can J Earth Sci* 18: 1506–1522
- Fortin Bélanger M (1977) Le complexe annulaire à carbonatites de St-Honoré (P.Q. Canada) et sa minéralisation à niobium : étude pétrographique et géochimique. MSc thesis, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Canada, 210p
- Fournier A (1993) Magmatic and hydrothermal controls of LREE mineralization of the St-Honoré Carbonatite, Québec. Unpublished M.Sc. thesis, McGill University, Montréal, Canada, 95p
- Grenier L, Tremblay JF, Sirois R (2013) NI 43-101 Technical report, updated mineral resource estimate for rare earth elements, 2012. IAMGOLD Corporation, 166p
- Higgins MD, van Breemen O (1996) Three generations of anorthosite-mangerite-charnockite-granite (AMCG) magmatism, contact metamorphism and tectonism in the Saguenay-Lac-Saint-Jean region of the Grenville Province, Canada. *Precambrian Res* 79:327–346
- Hogarth DD, Williams CT, Jones P (2000) Fresh rock zoning in pyrochlore group minerals from carbonatites. *Miner Mag* 64:683–697
- James TC, McKie D (1958) The alteration of pyrochlore to columbite in carbonatites in Tanganyika. *J Min Soc* 31:889–902
- Kamenetsky VS, Mitchell RH, Maas R, Giuliani A, Gaboury D, Zhitova L (2015) Chlorine in mantle-derived carbonatite melts revealed by halite in the St.-Honoré intrusion (Québec, Canada). *Geol* 43:687–690
- Knudsen C (1989) Pyrochlore group minerals from the Qaqarsuk carbonatite complex. In: Möller P, Cerný P, Saupé F (eds.) *Lanthanides, Tantalum and Niobium*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 80–99
- Kumarapeli PS, Saul VA (1966) The St. Lawrence valley system: A North American equivalent of the East African rift valley system. *Can J Earth Sci* 3:639–658
- Lumpkin GR, Ewing RC (1995) Geochemical alteration of pyrochlore group minerals: Pyrochlore subgroup. *Am Miner* 80:732–743
- Mangler MF, Marks MAW, Zaitzev AN, Eby GN, Markl G (2014) Halogens (F, Cl, and Br) at Oldoinyo Lengai volcano (Tanzania): Effects of magmatic differentiation, silicate-natrocarbonatite melt separation and surface alteration of natrocarbonatite. *Chem Geol* 365:43–53.
- Migdisov A, Williams-Jones, AE (2014) Hydrothermal transport and deposition of the rare earth elements by fluorine-bearing aqueous liquids. *Miner Deposita* 49:987–997
- Nasraoui M, Bilal E (2000) Pyrochlores from the Lueshe carbonatite complex (Democratic Republic of Congo): a geochemical record of different alteration stages. *J Asian Earth Sci* 18 :237–251
- Néron A (2015) Caractérisation de la minéralisation de la zone à terres rares de la carbonatite de Saint-Honoré, Québec, Canada. MSc thesis, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, Canada, 70p
- Thivierge S, Roy DW, Chown EH, Gauthier A (1983) Évolution du complexe alcalin de St.-Honoré (Québec) après sa mise en place. *Miner Deposita* 18 :267–283
- Zaitsev AN, Keller J (2006) Mineralogical and chemical transformation of Oldoinyo Lengai natrocarbonatites, Tanzania. *Lithos* 91:191–207
- Zurevinski SE, Mitchell RH (2004) Extreme compositional variation of pyrochlore-group minerals at the Oka carbonatite complex, Quebec: Evidence of magma mixing? *Can Miner* 42:1159–1168

## ANNEXE 6

Minéralogie approximative des échantillons provenant des forages S-4341 (sud) et S-4339 (nord). Approximations effectuées au microscope polarisant en début de projet et où l'expérience de l'auteur avec le pyrochlore et la columbite-(Fe) était moindre et que la relation d'altération les unissant était inconnue.

	Carbonates	Apatite	Biotite	Magnétite	Pyrite	Pyrochlore	Autres	Notes générales	Notes pyrochlore/columbite-(Fe)
JT-15-S01	65	20	10	0	1	4	0		Bruns foncés, RAS en cathodoluminescence
JT-15-S02	80	15	3	1	0	1	0		
JT-15-S03	68	25	1	0	1	5	0		Opakes, même en cathodoluminescence
JT-15-S04	15	4	46	0	1	4	30	46% bte/chl; autres=fp	Opakes, même en cathodoluminescence
JT-15-S05	62	25	1	0	2	10	0		Opakes, certains sont opakes ou oranges en cathodoluminescence
JT-15-S06	63	25	0	0	2	10	0		Pyrochlores opakes, mais TOUS oranges en cathodoluminescence
JT-15-S07									
JT-15-S08	69	0	15	15	0	1	0		
JT-15-S09	63	15	2	15	5	0	0		
JT-15-S10	63	15	5	15	2	0	0	Portion carbonatée	
JT-15-S10	25	50	15	0	2	8	0	Portion fragments	Bruns foncés ou opakes, présence Pcl et de Clb
JT-15-S11	80	20	0	0	0	0	0	Portion carbonatée	Brun foncé avec fines inclusions oranges en cathodoluminescence
JT-15-S11	20	55	0	5	5	15	0	Corridor	Opakes, quelques-uns oranges en cathodoluminescence
JT-15-S12	85	10	0	1	4	0	0		Opaque, RAS en cathodoluminescence
JT-15-S13	65	20	0	0	5	10	0		Bruns foncés ou opakes, PAS d'oranges
JT-15-S14	70	20	0	0	8	2	0		Opakes, RAS en cathodoluminescence
JT-15-S15	51	20	20	2	5	2	0		Brun foncé, RAS en cathodoluminescence
JT-15-S16	73	0	10	10	5	2	0		Brun foncé, certains sont détritiques en cathodoluminescence
JT-15-S17	30	5	42	0	1	2	20	46% bte/chl; autres=fp&zr	
JT-15-S18	10	0	60	0	0	0	30	autres=fp	En amas, opakes dans apatites
JT-15-S19	67	20	10	0	2	1	0		Opakes, détritiques en cathodoluminescence
JT-15-S20	70	15	0	0	4	6	5	Autres=isotrope	Oranges, détritiques en cathodoluminescence
JT-15-S21	70	20	0	0	0	10	0		Oranges et bleutés en cathodoluminescence

	Carbonates	Apatite	Biotite	Magnétite	Pyrite	Pyrochlore	Autres	Notes générales	Pyrochlore L.N.	Pyrochlore Cathodo
JT-15-N01	60	8	25	3	2	2	0	Portion syénitique	Plus grossiers, mais moins bien formés, fracturés	Orange=matrice
JT-15-N01	77	15	2	1	1	4	0	Portion dolomitique	Bruns, faible zonation	Brun=apatite
JT-15-N02	68	20	2	0	7	3	0		Fins, bruns, un peu fracturés	Brun
JT-15-N03	100	0	0	0	0	0	0			
JT-15-N04	10	15	68	0	5	2	0		Brun foncé	Brun=opaque, opaque=orange
JT-15-N05	5	0	15	0	5	2	73	Autre=feldspath	Brun	Vert
JT-15-N06	69	5	10	0	15	1	0		Brun	Opaque
JT-15-N07	35	5	20	0	15	1	24	Autre=feldspath	Bruns, fins, fracturés	Brun
JT-15-N08	59	15	20	1	5	0	0	Traces de pyro	Brun/opaque	Orange/brun
JT-15-N09	67	20	0	3	6	4	0		Brun/opaque	Opaque
JT-15-N10	50	35	0	0	5	10	0		Brun/opaque	Brun/opaque
JT-15-N11	60	25	5	0	5	2	3	Autre=inconnu	Brun	Brun
JT-15-N12	64	25	0	0	0	1	10	Autre=chlorite	Brun foncé, petits=matrice, gros=apatite	Opaque
JT-15-N13	40	10	15	30	0	5	0		Brun	Gros=vert, petit=opaque
JT-15-N14	52	5	5	35	2	1	0		Quasi opaque	Brun
JT-15-N15	20	15	15	35	2	8	5	Autre=chlorite	Brun foncé	Brun
JT-15-N16	60	30	0	0	10	0	0			
JT-15-N17	78	15	0	0	2	5	0	Pyrochlore?	Opaque	Opaque
JT-15-N18	58	10	0	15	2	0	15	Autre=pseudomorphes		
JT-15-N19	45	15	0	15	2	0	23	Autre=20%pseudo,3%chl		
JT-15-N20	98	2	0	0	0	0	0			
JT-15-N21	61	25	0	2	2	0	10	Autre=pseudomorphes		
JT-15-N22	60	15	2	6	10	5	2	Autre=chlorite	Opaque	Brun
JT-15-N23	5	3	70	0	0	2	20	Autre=feldspath	Opaque	Opaque
JT-15-N24	70	15	0	5	5	5	0		Opaque	Opaque
JT-15-N25	84	10	0	0	3	0	3	Autre=chlorite		
JT-15-N26	70	0	0	0	2	0	28	Autre=25%qz,3%chl		
JT-15-N27	80	5	2	9	3	0	1	Autre=inconnu		
JT-15-N28	72	15	0	4	1	0	8	Autre=chlorite		
JT-15-N29	68	2	0	25	0	0	5	Autre=chlorite		
JT-15-N30	50	25	6	15	4	0	0			
JT-15-N31	70	20	0	6	0	0	4	Dolom. Autre=chlorite		
JT-15-N31	54	10	0	30	0	0	6	Amas, Autre=5%chl,1%inc		
JT-15-N32	68	15	5	10	2	0	0			
JT-15-N33	65	30	0	0	5	0	0			
JT-15-N34	72	9	5	6	5	3	0		Quasi opaque	Opaque
JT-15-N35	80	9	4	1	3	3	0		Brun foncé	Opaque
JT-15-N36	55	30	4	4	6	1	0		Opaque	Opaque
JT-15-N37	64	15	0	15	5	1	0	10%APalt.,5%APg	Brun	Brun
JT-15-N38	70	16	0	8	3	3	0		Brun, columbites zonées	Brun/opaque
JT-15-N39	58	20	0	20	0	2	0		Opaque	Opaque
JT-15-N40	60	25	3	8	1	3	0		Brun	Brun
JT-15-N41	85	15	0	0	0	0	0	15%APalt.		
JT-15-N42	75	21	0	0	1	0	3	11%APalt.,10%APg		
JT-15-N43	74	20	0	2	3	1	0	10%APalt.,10%APg	Brun	Opaque
JT-15-N44	69	20	0	0	1	10	0		Brun/opaque	Opaque/orange/inclusion
JT-15-N45	65	20	0	0	5	10	0		Opaque	Opaque/orange/inclusion
JT-15-N46	60	31	0	0	5	4	0		Opaque	Orange/inclusion
JT-15-N47	55	25	0	0	10	10	0		Opaque	Orange/inclusion
JT-15-N48	60	30	0	0	2	1	7	Autre=5%inc.,2%chl	Beige	Opaque
JT-15-N49	15	26	15	30	10	4	0		Beige/brun	Brun/opaque
JT-15-N50	65	10	2	15	5	3	0		Brun	Opaque
JT-15-N51	81	10	3	5	1	0	0			
JT-15-N52	90	8	0	0	2	0	0	AP=altération		

## ANNEXE 7

Cette annexe comprend les descriptions pétrographiques de certaines lames. Il est toutefois très important de considérer que ces descriptions ont été produites en début de projet. Ainsi, il existait une certaine confusion entre le pyrochlore et la columbite-(Fe). La structure de la codification telle que présentée en début de projet par l'équipe de Niobec se retrouve ci-joint.

## Structure de la codification

TABLEAU DESCRIPTIF ET EVOLUTIF DES ROCHES DE MINE NIOBEC

Granulométrie		Structure	Réaction à l'acide	Code lithologique	
Roche	Gr. Fins	MASSIVE	non	C3N	C9 si rouge vin
		FOLIÉE	non	C3NA <3% Minéraux acc.	C3NB >5% Magnétite
	Gr. Moy.	MASSIVE	oui	CCA	
			non	C5	
				C3C	
		FOLIÉE	oui		
			non	C3A <3% Minéraux acc.	C3B >5% Magnétite
		MASS.- BX	non	Syénite	
	Gr. Gro.	MASSIVE	oui		
			non	C2	

**NOMENCLATURE**

C3N = Carbonatite Dolomitique ( Rouge et massive )  
C9 = Carbonatite Dolomitique ( Grains fin, massive, peu d'accessoire )  
C3NA et B = Carbonatite Dolomitique ( Généralement rouge brique, folié avec accessoire.)  
CCA = Carbonatite Calcitique ( Peu d'accessoire )  
C5 = Carbonatite Dolomitique ( Massive et peu d'accessoire )  
C3C = Carbonatite Calcitique ( Folié avec minéraux accessoire )  
C3A et B = Carbonatite Dolomitique ( A biotite, apatite et/ou magnétite )  
C2 = Carbonatite Dolomitique ( beige )  
Sy = Syénite ( rose ou grise à taches de chlorite ) ( Souvent en différent degrés d'altération )

JP ET FH    modifié par ML  
17-03-99    29-05-2012

## Descriptions macro- et microscopiques des échantillons de Niobec

### Échantillonnage de 2014, forage 4090

#### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	A001
Numéro de la lame mince	JT-14-007
Numéro du forage	4090
Métrage	4,27-4,47
Date de cueillette	10 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3NB

#### Description microscopique

Minéralogie : 75% carbonates, 15% apatite et 10% magnétite.

Informations générales : Roche minéralogiquement homogène. Peu de diversité, principalement des carbonates à grains moyens. Ils sont altérés (« sale »), probablement apatitisés, car présence d'apatite sur toute la lame. Deuxième type de carbonates, plus fins, sans mâcles/clivages principalement retrouvés dans des veines ou en amas. L'apatite est seule ou en amas, fine. Aucune biotite. Traces de chlorite.

Textures : Des zones de déformation s'observent dans le même axe que les carbonates de 2<sup>e</sup> génération. De même pour les magnétites qui ne possèdent pas d'inclusion. Les carbonates ne montrent pas de biréfringence. Certains grains de carbonates sont aciculaires dans ces secteurs.

Minéralisation : Ne semble pas y avoir quelconque minéralisation en pyro/col.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	A002
Numéro de la lame mince	JT-14-009
Numéro du forage	4090
Métrage	7,2-7,35
Date de cueillette	10 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3NB

### Description microscopique

Minéralogie : 59% carbonates, 30% apatite, 10% magnétite et 1% pyrochlore (?).

Informations générales : Roche homogène à grains fins de carbonates et d'apatite. La roche est fortement altérée, les apatites semblent être en équilibre, car ils ne sont pas modifiés. Les carbonates sont toutefois altérés. Il ne semble pas y avoir de « pattern »; la roche est homogène, altérée et riche en apatite.

Textures : Les apatites sont hypidio- à idiomorphiques. Plusieurs sont allongés. Il y a une portion fortement apatitisée (rougeâtre). Autrement, les carbonates sont altérés et peu ont gardé leurs textures originelles. Il y a une faible orientation préférentielle des apatites. Les magnétites sont déformées et ont des inclusions d'apatite.

Minéralisation : 10% d'opakes, aucun sulfure. Il y a des grains bruns foncés qui ne ressemblent pas aux pyrochlores habituellement observés, mais peuvent en être. Ils ne sont pas nécessairement dans la zone rougeâtre.

Notes : La roche ne ressemble pas à JT-14-007 (A001) qui est du même forage, mais 3m plus bas. Quelques grains brunâtres, possiblement des pyrochlores. Ils sont fins.



### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	A003
Numéro de la lame mince	JT-14-003
Numéro du forage	4090
Métrage	63,0-63,11
Date de cueillette	10 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3C

### Description microscopique

Minéralogie : 77% carbonates, 10% apatite, 5% biotite, 4% magnétite, 3% pyrochlore (?) et 1% pyrite.

Informations générales : Roche dominée par les carbonates bien formés. Altération inexistante. Certains grains possèdent une biréfringence dans le bleu 2<sup>e</sup> ordre, sinon tous ressortent gris. Majoritairement des grains grossiers, mais plus fins/moyens dans des corridors où se retrouve la majeure quantité des apatites subarrondies et fines, la biotite et la magnétite.

Textures : La biotite, hypidiomorphe, ne montre pas de clivage. Observation ponctuelle de chlorite. Plusieurs carbonates en chevauchent d'autres. Les corridors sont riches en apatite qui se retrouve très peu ailleurs.

Minéralisation : Les opaques sont de la magnétite. Quelques inclusions de carbonates et d'apatite dans la magnétite. Traces de pyrite xénomorphe, très fine. Il y aussi des grains fins aux allures d'opaques, mais plus brun foncé qui pourraient être de la minéralisation en pyrochlore. Très difficile de confirmer.

Notes : Certains grains moyens incolores à faible pléochroïsme, extinction à 10°, B-. Muscovite? Baryte?

Des grains sont losangiques, biref dans les bleus.

Les quasi-opaques brunâtres ressemblent à des pyrochlores fins. Phase accessoire?

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	A004
Numéro de la lame mince	JT-14-015
Numéro du forage	4090
Métrage	72,53-72,63
Date de cueillette	10 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3A

### Description microscopique

Minéralogie : 65% carbonates, 20% apatite, 10% biotite, 4% pyrochlore et 1% pyrite.

Informations générales : Roche homogène montrant relativement beaucoup de vide, possiblement de l'halite lessivée. Les carbonates sont à grains grossiers, mais ne montrent pas de textures, sont xénomorphes et fortement altérés. Les apatites ne sont évidemment pas affectées. En effet, l'apatite est idiomorphe, quelque peu arrondie ou allongée et se retrouve selon une orientation préférentielle, sans être pour autant en amas. La biotite est fine et altérée, mais montre encore ses clivages.

Textures : Plusieurs veinules d'apatite et de carbonates. « Trend » d'apatite en équilibre avec l'altération. On pourrait dire qu'elles sont tardives, mais probablement qu'elles n'ont pas été affectées par le(s) fluide(s). Les contacts des carbonates sont irréguliers, presque inexistant.

Minéralisation : La pyrite est xénomorphe et fine, mais non altérée ni fracturée. Les pyrochlores sont brun foncé en L.N. Ils montrent des bordures très franches. Ils sont quelque peu fracturés, mais bien conservés.

Notes : À observer sur le MEB le grain cubique qui n'est pas de la pyrite. Type de pyrochlore extrêmement bien conservé? Le petit cube à côté est recoupé par la pyrite.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	A005
Numéro de la lame mince	JT-14-016
Numéro du forage	4090
Métrage	115,67-116,79
Date de cueillette	10 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3A

### Description microscopique

Minéralogie : 60% carbonates, 30% apatite, 5% biotite, 3% pyrite et 2% pyrochlore.

Informations générales : Ressemble beaucoup à JT-14-015 (A004) qui est un peu moins loin dans le forage. Il y a toutefois plus d'apatite, toujours aussi arrondie ou allongée, en équilibre dans la roche. Les carbonates montrent une forte altération.

Textures : La biotite est un peu plus en baguette qu'elle ne l'était dans A004. Elle montre une faible chloritisation par endroits. Quoique l'apatite montre une orientation préférentielle, mais reste disséminée dans la roche, il y a un corridor où la proportion est plus élevée. Il y a quelques veinules de carbonates.

Minéralisation : La pyrite est très fine, xénomorphe et disséminée. Un seul gros grain s'observe. Le pyrochlore a des bordures relativement franches et des inclusions de carbonates. Certains grains semblent être des reliques de magnétite riches en pyrite de remplacement. Mais aucun magnétisme décelé.

Notes : Comme A004, plus d'apatite, mais par contre autant de pyrochlore sinon moins. Autant altérée, mêmes textures.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	A006
Numéro de la lame mince	JT-14-001
Numéro du forage	4090
Métrage	133,01-133,2
Date de cueillette	10 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	Sb (syénite bréchique)

### Description microscopique

Minéralogie : 53% Kspar, 40% biotite, 3% apatite, 3% carbonates et 1% pyrite.

Informations générales : Syénite bréchique à glomérophyres (2-5cm) de feldspath potassique. Les feldspaths sont xénomorphes et montrent une extinction roulante et une altération avancée «sale». Ils sont formés de plusieurs grains. Des grains de pyrite hypidio- à idiomorphes sont en inclusion dans les Kspar.

Les brèches sont dominées par la biotite (93%), les carbonates (3%) et l'apatite. La biotite se retrouve sous deux types : une première hypidiomorphe avec clivage apparent, mais ondulant et l'autre qui est xénomorphe, clivage quasi-inexistant.

Textures : Quelques veines de carbonates au clivage bien défini recoupent la syénite et la biotite. La veine centrale (dominante) est carbonatée, mais altérée. Il y a une orientation préférentielle de la biotite.

Minéralisation : 1% de pyrite hypidio- à idiomorphe dans la syénite seulement.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	A007
Numéro de la lame mince	JT-14-018
Numéro du forage	4090
Métrage	202,15-202,27
Date de cueillette	10 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3A/SC3A (Échantillon représente C3A, mais la lithologie est plus une SC3A)

### Description microscopique

Minéralogie : 70% carbonates, 15% apatite, 8% chlorite, 5% (?), 1% pyrite et 1% pyrochlore.

Informations générales : En premier lieu, toute la biotite a été chloritisée. Les carbonates sont grossiers, altérés, aux clivages souvent losangiques et aux bordures affectées par l'altération. L'apatite est fine, arrondie et est distribuée aléatoirement. Un minéral inconnu est observé, souvent aciculaire, probablement dans la bastnäsite.

Textures : Les clivages des carbonates sont souvent losangiques d'autant plus que certains grains, plus petits, sont de cette forme. Les cœurs sont moins affectés par l'altération. Les apatites sont dans les grains de carbonates. Il n'y a pas d'amas régulièrement observé, sauf dans les veines apatitisées.

Minéralisation : Les pyrochlores sont fins, octaédrique, peu affectés et montrent des inclusions de pyrite et d'autres opaques. La pyrite est très fine, xénomorphe et disséminée. Seule un gros stringer s'observe, mais en relation avec une veine. Un grain entouré ressemble à du pyrochlore; il est résorbé.

Autres : Certaines apatites montrent des zonations. Si les minéraux aciculaires sont de la bastnäsite, ce serait une des seules lames à en avoir.  
Vérifier l'authenticité du grain résorbé qui semble être du pyrochlore près de la bordure de la lame.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	A008
Numéro de la lame mince	JT-14-019AB
Numéro du forage	4078
Métrage	111,23-111,35
Date de cueillette	10 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3A

### Description microscopique

#### **JT-14-019A**

Minéralogie : 53% carbonates, 25% pyrite, 15% apatite, 5% biotite et 2% pyrochlore.

Informations générales : C'est sommairement le festival des inclusions. Plusieurs grains de carbonates contenus dans de plus gros. Ils sont moins altérés et sont souvent losangiques. Les plus grossiers sont très altérés à un tel point que les contacts sont presque inexistantes. Les cœurs des pyrites sont lessivés.

Textures : Les apatites sont en équilibre dans la roche ne montrant pas d'altération quelconque. Les grains sont idiomorphes, allongés selon un axe préférentiel. Aucun clivage apparent dans les carbonates, les contacts disparaissent.

Minéralisation : Les pyrites sont très altérées. Elles montrent des vides, possiblement de l'halite ayant été lessivée et qui était en remplacement. Cela signifie probablement la venue syn-magmatisme des sulfures. Quelques grains de pyrochlore ont été observés de forme hexagonale ou octaédrique. Ils sont fins et généralement associés aux apatites. Surtout observé dans le coin de la lame (granulo plus fine près du #lame).

Autres : Aucune différence apparente entre 019A et 019B. Pyrochlores associés aux apatites. Vérifier les inclusions dans les pyrites. Minéral inconnue en plus des vides (halite?).

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	A009
Numéro de la lame mince	JT-14-020
Numéro du forage	4078
Métrage	148,35-148,44
Date de cueillette	10 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3A

### Description microscopique

Minéralogie : 52% carbonates, 35% apatite, 5% biotite, 5% pyrite et 3% pyrochlore.

Informations générales : Roche à grains fins, homogène, non magnétique. Elle est dominée par les carbonates et l'apatite. Il y a quelques grains de biotite où certains sont chloritisés. Il y a deux types de carbonates : des carbonates fortement altérés de forme xénomorphe avec quelques au cœur moins affecté. Le second type est des grains idiomorphes, souvent des losanges, peu altérés. L'apatitisation est forte, car des amas d'altération ressemblent à des grains opaques. Seule la L.R montre que c'est de la gangue. L'apatite est idiomorphe, toujours en équilibre, suivant une orientation préférentielle. Certains sont fracturés, mais c'est une minorité.

Textures : Outre la présence de seconds carbonates moins affectés par l'altération, les contacts absents des carbonates altérés et l'équilibre des apatites, la lame ne montre pas de textures intéressantes. Les relations d'inclusions ne sont pas discriminantes.

Minéralisation : La pyrite est très fine à moyenne, souvent arrondie (gouttelettes très fines). Elle est probablement tardive, car elle est ni altérée, ni fracturée. Inversement, le pyrochlore est altéré, fracturé et xénomorphe. Il est très fin. Attention! Certains grains sont mieux conservés et montrent même des zonations en L.R (voir encerclé).

Autres : Le pyrochlore est difficile à identifier par sa forme et la présence d'amas d'altération n'aide en rien la différenciation. Avec l'œil, il est possible de l'observer, il est fin, xénomorphe, ressemble à de la magnétite. Attention particulière aux grains zonés.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	A010
Numéro de la lame mince	JT-14-021
Numéro du forage	4083
Métrage	6,45-6,57
Date de cueillette	10 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3A

### Observations générales

Couleur générale?	Rose pâle avec portions grises
Magnétique?	
Réactif au HCl?	Non
Sulfures?	Oui, 1% pyrite disséminée
Veines/veinules?	Veinules apatite
Minéraux observés?	Carbonates, apatite, biotite, magnétite

### Description microscopique

#### **\*\* High grade \*\***

Minéralogie : 54% carbonates, 30% apatite, 10% pyrochlore, 4% pyrite, et 2% biotite.

Informations générales : Roche homogène minéralogiquement. Dominée par les carbonates fortement altérés aux bordures mal définies et difficile à voir. La biotite se retrouve en un amas de plusieurs grains, altérés et « mangés ». L'apatite se retrouve sous forme de veines et de corridors. Quelques amas d'apatitisation sont visibles.

Textures : L'apatite se retrouve surtout en amas suivant des corridors. Ces corridors sont de couleur rougeâtre en mégascopique. La texture équi-granulaire est observée.

Minéralisation : La pyrite est hypidio- à idiomorphe. Un grain est un cube parfait. Certaines pyrites sont fracturées. Quant aux pyrochlores, ils sont majoritairement idiomorphes, distribués aléatoirement dans la lame. On remarque toutefois une centralisation importante dans les corridors d'apatite où les grains sont un peu plus petits et moins bien formés, mais plus prédominants.

Autres : Très grande quantité de pyrochlore dans la lame, plus spécifiquement dans les corridors riches en apatite. Une des lames les plus riches.



### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	A011
Numéro de la lame mince	JT-14-022
Numéro du forage	4083
Métrage	6,57-6,68
Date de cueillette	10 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3A

### Observations générales

Couleur générale?	Rose pâle
Magnétique?	
Réactif au HCl?	Non
Sulfures?	1% pyrite disséminée
Veines/veinules?	Oui, C2Sucre et apatite
Minéraux observés?	Carbonates,apatite, magnetite, biotite

### Description microscopique

La lame est sensiblement identique à JT-14-021 (A010). Toutefois, même si elle provient à moins de 20 cm, le % d'apatite et de pyrochlore a diminué drastiquement à 25 et 5% respectivement. Les textures restent les mêmes : les apatites montrent des points triples, les carbonates sont altérés et la pyrite est idiomorphe. Toutefois, la relation apatite et pyrochlore semble moins véridique à moins de 1m de l'autre lame.

Minéralisation : Le pyrochlore est encore aussi bien formé aux inclusions d'opakes et de carbonates.

Autres : Je répète, la relation apatite et pyrochlore semble moins véridique à moins de 1m de l'autre lame. Le pyrochlore est plutôt disséminé dans la lame. Il est moyen à grossier.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	B001
Numéro de la lame mince	JT-14-002
Numéro du forage	4103
Métrage	5,3-5,43
Date de cueillette	17 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	Sb

### Description microscopique

**\*\* Ne semble pas être une syénite. Ce sont des carbonates altérés (apatitisation) \*\***

Minéralogie : 50% apatite, 45% carbonates, 4% pyrochlore (?), 1% pyrite et traces de baryte.

Informations générales : Carbonate dominée par l'apatite qui a manifestement altéré la roche. Les apatites sont très fines, xénomorphes à subarrondis, fracturées. Elles forment des amas. Les carbonates (45%) sont à grains moyens, hypidiomorphes. La roche est fortement «sale» par l'altération, l'apatitisation. Il n'y a pas de biotite.

Textures : Une veine de carbonate de 0,5mm recoupe la lame. Elle est recoupée par un minéral sans clivage à biréfringence élevée aux contacts très francs avec les carbonates (baryte).

Minéralisation : 1% de pyrite disséminée idiomorphe (cubique) et fracturé. 4% de pyrochlore (ou symplectite?) très foncé en L.N. aux contacts très francs, lorsque visibles, mais fortement fracturés avec inclusions de carbonates. À observer en L.R. Les pointes sont souvent tronquées et les carbonates semblent résorber les grains.

Notes : Roche dominée par l'apatite. Près de 5% de pyrochlore.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	B002
Numéro de la lame mince	JT-14-012
Numéro du forage	4103
Métrage	109,9-110,05
Date de cueillette	17 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3NA

### Description microscopique

Minéralogie : 65% carbonates, 25% apatite, 5% pyrochlore, 4% pyrite et 1% magnétite.

Informations générales : Roche à grains fins à grossiers dominée par les carbonates, mais aux glomérporphyres d'apatite. Les carbonates qui ne sont pas dans le corridor sont plus grossiers et montrent des clivages, mais sont altérés. Inversement, ceux dans le corridor sont fins, sans clivages. La roche ne contient pas de micas.

Textures : Très jolies textures visibles. La lame montre deux portions aux carbonates grossiers recoupés par un corridor à carbonates plus fins et à grande proportion d'apatite. Les glomérporphyres d'apatite mesurent jusqu'à 0,8cm et sont de forme en œillet. Ils sont formés de minuscules baguettes d'apatite xénomorphes à extinction roulante et aux bordures arrondies.

Minéralisation : La pyrite est disséminée. Elle n'est pas altérée, est xéno- à hypidiomorphe et possède des inclusions en apatite et en carb. Le pyrochlore est altéré et possède des inclusions d'opaques en plus d'être « mangé » par des carbonates par endroits. Ils sont xénomorphes.

Notes : Très belle texture d'œillet (amas d'apatite entouré de carbonates). Aucune apatitisation rougeâtre. Même texture que les amas d'apatite dans les corridors, sauf que là, les glomérporhyres sont parfaits, les sous-grains ne se voient pas sauf en L.P. Les apatites sont en baguettes très fines.

Un pyrochlore a été entouré. Il ne montre rien en L.N., mais une relique de zonation losangique en L.R.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	B003
Numéro de la lame mince	JT-14-013
Numéro du forage	4103
Métrage	145,48-145,6
Date de cueillette	17 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3NA

### Description microscopique

Minéralogie : 76% carbonates, 20% apatite, 3% pyrochlore et 1% pyrite.

Informations générales : Roche dominée par les carbonates. La roche est relativement homogène. Les carbonates sont à grains moyens, peu de clivages visibles. Ils sont altérés, mais certains grains montrent un cœur non affecté. Dans le corridor, l'apatite se retrouve en amas glomérporphyriques arrondis ou allongés tel qu'observé habituellement. Hors de cette zone, l'apatite est disséminée.

Textures : Les textures dans la zone extérieure (hors du corridor) sont limitées. Les clivages des carbonates sont plus évidents, les contacts des grains sont bien définis et c'est là que les cœurs sont les plus intacts. Dans le corridor, il semble y avoir présence d'halite lessivée. Les carbonates sont plus fins et l'apatitisation est plus importante, altérant davantage les carbonates et en créant des amas d'apatite.

Minéralisation : Les pyrochlores sont xéno- à hypidiomorphes. Ils ont des inclusions de carbonate, d'apatite et de vide (halite?). Certains grains sont mangés par les carbonates. Certains ont une forme octaédrique aux pointes tronquées (de couleur très foncée). Il semble y avoir une distribution préférentielle dans la zone plus affectées par les veinules et les amas d'apatite.

La pyrite est hypidio- à idiomorphe, peu fracturée, non altérée et sans inclusion.

Notes : Certains minéraux idiomorphes ont été lessivés, probablement de l'halite. Les bordures sont très franches.

Difficile de différencier magnétite et pyrochlore dans la lame. Semble s'apparenter à des pyrochlores, mais ils sont affectés, bordures moins évidentes, plusieurs inclusions.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	B004
Numéro de la lame mince	JT-14-014
Numéro du forage	4103
Métrage	146,0-146,2
Date de cueillette	17 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	Contact C3NA / C3N

### Description microscopique

Minéralogie : 78% carbonates, 20% apatite et 2% pyrochlore.

Informations générales : S'apparente fortement à JT-14-013 (B003), mais un pseudo-contact est visible entre C3N/C3NA. La portion C3N se caractérise par des carbonates idiomorphes, avec de beaux clivages et qui sont peu altérés, mais certains le sont tout de même un peu. Il y a peu de minéraux accessoires. Le C3NA correspond à des carbonates moins massifs, moins équi-granulaires. Il y aussi un corridor d'apatite qui est toutefois plus chaotique et méandreux qu'à l'habitude avec des grains plus fins et xénomorphes.

Textures : La roche est similaire minéralogiquement à B003, mais les textures ont évoluées. Les carbonates sont moins affectés, beaucoup plus préservés et définis à l'allure granoblastique (C3N). Le corridor ne contient pas d'amas d'apatite, mais des lignées d'apatite allongée très fines. Une apatitisation pervasive s'observe, mais des parties ponctuelles sont présentes (tâches brunâtres).

Minéralisation : Tout comme B003, la minéralisation se retrouve majoritairement dans le corridor apatitisé. Les grains de pyrochlore sont hypidio- à idiomorphes (hexaédrique) aux pointes tronquées. Ils possèdent plusieurs inclusions d'un second minéral opaque et quelques grains ont montré des inclusions de pyrite. Il est intéressant d'observer des carbonates s'accaparer des pyrochlores (résorbés).

Notes : Aucun sulfure, biotite et possiblement de magnétite.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	B005
Numéro de la lame mince	JT-14-005
Numéro du forage	4103
Métrage	189,52-189,73
Date de cueillette	17 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3NS

### Description microscopique

Minéralogie : 87% carbonates, 10% apatite, 2% pyrochlore et 1% pyrite.

Informations générales : Lame dominée par les carbonates, probablement de la dolomie de par leur clivage strié et la provenance de la zone (C3NS=dolomie). Les carbonates sont de taille variable, de fins à grossiers. Peu, voir aucun, minéraux accessoires. Il y a sur la lame une zone apatitique rougeâtre très altérée où peu de carbonates persistent. Le secteur possède néanmoins plus de pyrite et une minéralisation en pyrochlore.

Textures : Portions plus bréchiques aussi dominées par des carbonates plus fins. La portion riche en apatite montre une couleur rosée et une allure sale. Les carbonates ont été détruits et sont plus fins.

Minéralisation : Traces de pyrite idiomorphe sur la lame. Dans le secteur apatitisé, le pyrochlore possède encore des bordures franches, mais elles sont affectées par le milieu, elles sont résorbées. Les grains possèdent plusieurs inclusions et ont souvent les pointes tronquées.

Notes : Grain rectangulaire idiomorphe à doubles bordures. Biref dans les jaunes. À gauche de l'amas d'apatite (entouré).  
Le pyrochlore s'observe que dans l'amas d'apatite et est fortement altéré, conséquence de sa distribution.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	B006
Numéro de la lame mince	JT-14-017AB
Numéro du forage	4103
Métrage	194,72-194,86
Date de cueillette	17 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3NAS

### Description microscopique

#### **JT-14-017A**

Minéralogie : 60% carbonates, 25% apatite, 10% pyro/col et 5% pyrite.

Informations générales : La lame se présente sous deux portions distinctes. La première correspond à un champ de carbonates altérés avec peu de minéraux accessoires. Les contacts sont de plus en plus difficiles à observer, mais certains points triples sont visibles. La granulométrie de ces grains est grossière, mais de plus fins carbonates se retrouvent en inclusions, beaucoup moins altérés et souvent de forme pseudo-losangique. La seconde portion présente une forte altération des carbonates, des apatites à grains grossiers et d'autres plus fins à points triples qui se retrouvent directement dans l'altération.

Textures : Des « patches » d'altération sont distribuées dans la roche. Une veine de halite est aussi visible sur la lame.

Minéralisation : La pyrite est hypidio- à idiomorphe et se retrouve en stringers. La minéralisation en niobium se retrouve sous forme de grains altérés, fracturés et détruits. Une relique de grain de 0.5cm est visible, mais seuls les contours sont restés. Certains grains plus fins sont visibles, moins affectés. Ils semblent provenir d'un autre contexte.

Notes : Beaucoup d'altération, les grains minéralisés sont d'une couleur verdâtre à l'œil nu. Soit une altération ou un autre type de pyrochlore (ou de la columbite). Ils sont fortement affectés par le milieu.

#### **JT-14-017B**

**\*\* Contient un pyrochlore très bien zoné \*\***

On se retrouve directement dans la zone bréchique. Les apatites sont grossières, les quelques biotites sont fortement affectées par l'altération, la pyrite est grossière, hypidiomorphe.

La minéralisation semble de seconde génération. Fine, mais très bien formée, peu affecté. Une résorption est tout de même visible sur certains grains.

Notes : Similaire en certains points de 017A. La minéralisation atteint 5-8%. Un minéral qui ressemble à de la muscovite (incolore, faibles clivages, bordures dentelées) est observé.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	C001
Numéro de la lame mince	JT-14-008
Numéro du forage	4092
Métrage	234,14-234,24
Date de cueillette	17 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3NT

### Description microscopique

Minéralogie : 70% carbonates, 20% apatite, 5% pyrite, 3% pyrochlore et 2% magnétite.

Informations générales : Roche hétérogène au titre de la minéralogie et des textures. Quoique dominée par les carbonates, la roche montre des secteurs très riches en apatite qui s'observent en corridors. Les apatites sont en amas allongés entourés d'un fluide riche en phosphore (couleur rougeâtre).

Textures : Outre le corridor riche en apatite, la lame montre de nombreuses « nervures » toutes orientées où les carbonates sont fins et beaucoup plus altérés que ceux qui ne semblent pas avoir été affectés (peu altérés, grains moyens, clivages plus apparents).

Minéralisation : 3% de pyrochlore de couleur foncée en L.N. Fracturé avec des inclusions d'apatite ou de carbonates. Quoique disséminée sur la lame, sa présence semble accentuée dans les zones apatitisées. La pyrite (5%) est hypidio- à idiomorphe et suit les zones de faiblesse, soit les nervures.

Notes : La cathodoluminescence a montré que les apatites dans le corridor étaient magmatiques (sans halo bleutée).



### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	D001
Numéro de la lame mince	JT-14-011
Numéro du forage	4091
Métrage	190,69-190,82
Date de cueillette	17 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3NA

### Description microscopique

#### **\*\* High grade \*\***

Minéralogie : 50% apatite, 20% pyrite, 15% pyrochlore/columbite, 10% carbonates, 5% magnétite et traces de biotite.

Informations générales : Roche très homogène à grains fins à moyens montrant des stringers de pyrite. Dominée par l'apatite et la pyrite. Les carbonates sont accessoires. Quelques grains de biotite en chloritisation sont observés. Les AP sont en équilibre, pas les carbonates. Dominance d'apatite, mais aucune apatitisation, absence de couleur rouge.

Textures : Écoulement magmatique très important. L'apatite, la pyrite, le pyrochlore/columbite et la magnétite suivent la même direction. Les carbonates bréchifiés sont entraînés par le fait même. De fines veinules de carbonates sont visibles. Les carbonates sont évidemment très altérés et ont des inclusions d'apatite.

Minéralisation : Il y a deux types de pyrite : l'un est xénomorphe et altéré. L'autre est idiomorphe (cubique) et non affecté par quelconque phénomène. Le 2<sup>e</sup> type ne représente que 10% des pyrites. Le pyrochlore est à forme rectangulaire à hexagonal. Il est fin et possède des inclusions de carbonates (majoritairement) et d'apatite. La columbite (ou second type de pyrochlore) est beaucoup plus grossière, moins opaque et plus brun, mais en moindre quantité. Elle a les pointes tronquées très franches et montre une zonation très importante (voir le grain au pourtour de la lame!). Certains grains sont résorbés.

Notes : Difficile de déterminer si les différences dans les grains de pyrochlore sont expliquées par la présence de 2 types ou si c'est pyrochlore et columbite. Semble être de la columbite considérant les pointes tronquées. La minéralisation semble magmatique, car aucune présence d'hydrothermalisme (apatitisation, rouge) et les pyrochlores sont idiomorphes.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	D002
Numéro de la lame mince	JT-14-010
Numéro du forage	4091
Métrage	71,85-72,0
Date de cueillette	17 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	C3NB

### Description microscopique

Minéralogie : 40% magnétite, 27% pyrite, 18% carbonates, 10% biotite et 5% apatite.

Informations générales : Roche très différente de ce qui s'observe généralement. Dominée par la magnétite et la pyrite. Les carbonates forment des amas rectangulaires et sont souvent associés à la biotite. De fines inclusions de biotite en aiguilles se situent dans les carbonates.

Textures : Outre les relations d'inclusion de la biotite dans les carbonates et la dissémination des apatites, la texture graphique des magnétites et les inclusions dans les pyrites (pyrrhotite?) sont intéressantes.

Minéralisation : La pyrite est xénomorphe, semble tardive, car elle recoupe la magnétite et possède des inclusions d'un second opaque gris pâle (pyrrhotite?). La magnétite a une texture graphique très développée. Aucune minéralisation en pyrochlore n'a été observée. Soit qu'elle est inexistante, soit qu'elle se confond dans les oxydes dominants.

Notes : Il serait intéressant de voir quel minéral correspond aux tâches brunes arrondies qui semblent être de la biotite.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	D003
Numéro de la lame mince	JT-14-004
Numéro du forage	4048
Métrage	~206-209m, à vérifier exactement
Date de cueillette	Antérieurement au 17 septembre 2014
Code lithologique selon G. Ratthé	-----

### Description microscopique

Minéralogie : 40% carbonates, 25% biotite, 20% apatite, 10% pyrochlore sodique (MEB) et 5% magnétite.

Informations générales : Roche très hétérogène. Secteur d'une part dominée par les carbonates moyens avec faibles clivages. D'une autre part, une portion riche en biotite très fine, xéno- à hypidiomorphe, mais avec clivages. Autrement, la biotite est disséminée à grains moyens. Les pyrochlores, grossiers, se retrouvent en amas. Les apatites sont arrondis ou allongés, ressemble à un écoulement au travers des carbonates.

Textures : Les apatite sont très fines et s'observent en périphérie des carbonates. Elles sont arrondies ou allongées comme dans un écoulement. Une bordure réactionnelle ondulée d'altération s'observe à la bordure ap-carb.

Minéralisation : Les opaques sont de forme et taille variables, très fracturée en L.R. Les pyrochlores sodiques sont moins foncés qu'à l'habitude en L.N (donc possible de la columbite, mais confirmé par MEB). Ils sont fortement facturés, souvent disloqués, mais montrent une forme hexagonale, car les pointes sont tronquées et anguleuses. Certains possèdent des inclusions d'apatite et de biotite. La biotite va même jusqu'à imbriquer le pyrochlore par moments.

Notes : Cet échantillon provient d'Alexis qui avait observé des minéraux blanchâtres assez durs. S'avère être des pyrochlores sodiques qui sont aussi observés dans le nouveau forage S4339.

La cathodoluminescence a montré des zonations magmatiques dans les apatites.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	E001
Numéro de la lame mince	JT-14-006
Numéro du forage	4088
Métrage	127,6-127,8
Date de cueillette	17 septembre, mais roche d'un rack
Code lithologique selon G. Ratthé	C3NB

## Description macroscopique

Magnétite
-----------

## Description microscopique

Minéralogie : 33% magnétite 30% carbonates, 30% apatite, 5% biotite, 1% pyrite et 1% pyrochlore.

Informations générales : Roche dominée par de la magnétite grossière hypidio- à idiomorphe. Des inclusions d'apatite et de biotite s'y retrouvent. Outre les corridors riches en apatite, l'apatite s'observe aussi en amas dans les veines de carbonates. Les magnétites au pourtour des veines de carbonates sont altérées et n'ont pas la même forme.

Textures : Certains grains de biotite sont plus foncés et ont des clivages. Une faible chloritisation est visible sur certains grains. Les carbonates sont fins, déformés. Des zones de déformation (ondulation) sont visibles autour des grains plus compétents, à l'occurrence des magnétites.

Minéralisation : 1% de pyrite idiomorphe. Plus de 30% de magnétite et quelques grains de pyrochlore. Le pyrochlore est grossier et possède des contacts francs, mais est empesté d'inclusions de toute sorte.

Notes : Quelques grains de pyrochlore ont été observés. Deux ont été entourés. Ils sont affectés, semblent avoir été arrachés et emportés.

### Identification de l'échantillon

Numéro d'échantillon	16-203-19
Numéro de la lame mince	JT-14-023AB
Numéro du forage	?
Métrage	?
Date de cueillette	
Code lithologique selon G. Ratthé	

### Description macroscopique

Altération rouge perpendiculaire? Récolté le 9 septembre. Donné par G.Matton. 2 photos disponibles

### Description microscopique

**\*\* Pyrochlore parfaitement zoné \*\***

#### **JT-14-023A**

Minéralogie : 70% carbonates, 17% apatite, 4% biotite, 4% pyrite, 3% pyrochlore et 2% magnétite.

Informations générales : L'une des roches les mieux conservées dans celles observées. Les carbonates sont grossiers, les clivages et les mâcles sont très bien définies avec une orientation préférentielle. Les caractéristiques microscopiques suggèrent deux types de carbonates. Les apatites sont généralement disséminées, mais certains amas sont présents en concordance avec les veinules et les zones d'altération où les carbonates sont aussi affectés. La biotite est idiomorphe et recoupe les pyrochlores et la magnétite.

Textures : Plusieurs textures d'intérêt. Tout d'abord, les carbonates et l'apatite sont équi-granulaires. L'apatite se retrouve autant en inclusions dans les carbonates que dans le même environnement. Une veine en bordure de la lame est dominée par une apatite très fine, mais est très riche en pyrochlore, mais de forme xénomorphe et fracturée. Rien à voir avec le pyrochlore si bien défini dans la lame.

Minéralisation : La pyrite est de taille moyenne, xénomorphe, souvent allongée, quelque peu fracturée. La magnétite est difficile à différencier du pyrochlore, mais la pseudotexture graphique aide un peu. La magnétite est xénomorphe et contient souvent des inclusions de biotite. Le pyrochlore est très bien formé et montre des zonations surprenantes (si ce n'est pas seulement la forme octaédrique projetée..). Ils sont idiomorphes, fins à moyens. Quelques biotites les recoupent.

Notes : Très belle roche aux caractéristiques intéressantes, donc la minéralisation disséminée, mais davantage concentrée dans la seule veine visible sur la lame mince. La magnétite, en L.R, est plus pétante, un gris plus métallique que le pyrochlore. Très subtil toutefois.

## Descriptions macro- et microscopiques des échantillons de Niobec

### Forage 4339 – N000°/-6°, 235m

#### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N01
Métrage	5,4
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie et interface avec syénite altérée

#### Description microscopique

Minéralogie : Portion dolomitique : 77% carbonates, 15% apatite, 4% pyrochlore 2% biotite, 1% magnétite et 1% pyrite.

Portion syénitique : 60% carbonates, 25% biotite, 8% apatite, 3% magnétite, 2% pyrite et 2% pyrochlore.

Informations générales : Tout d'abord, l'interface est représenté par du vide, probablement lessivé. La portion dolomitique est composée de carbonates grossiers, mais altérés. Quelques apatites et pyrochlores fins sont libres dans les carbonates. Quelques corridors d'apatites allongées ou arrondies sont visibles où la plupart des accessoires y sont. Les biotites sont pâles, xénomorphes. Certaines apatites sont isotropes.

La portion syénitique montre quant à elle aucun couloir d'apatites. Certains grains y sont, mais ils sont disséminés. Des clastes centimétriques de biotite sont présents. Les carbonates montrent un front d'altération un peu moins important de ce côté.

Textures : Peu d'information, les biotites dans la portion syénitique montre des zircons. Certains points triples chez les apatites.

Minéralisation : La pyrite est idiomorphes, cubiques, sans artifice. Les magnétites semblent avoir été remplacées par la pyrite, voir les grains en bordure à la texture de magnétite, mais aux caractéristiques optiques de la pyrite. Quant aux pyrochlores, ils sont la plupart fins, mais très bien formés. Ils sont bruns, certains montrent une faible zonation. Attention toutefois, car quelques grains sont bruns, mais montrent des portions opaques. Est-ce de l'altération? Remplacement?

Les pyrochlores dans la portion syénitique sont plus grossiers, mais moins bien formés; ils sont hypidiomorphes, fracturés. Quelques-uns montrent aussi des portions noires.

Autres : Quelques pyrochlores sont libres dans les carbonates, mais la majorité suit les veinules d'apatite. Ils sont idiomorphes et bruns. Porter une attention particulière aux pyrochlores altérés opaques.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N02
Métrage	6,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie foliée

### Description microscopique

Minéralogie : 68% carbonates, 20% apatite, 7% pyrite, 3% pyrochlore et 2% biotite.

Informations générales : Roche dominée par les carbonates. Ils sont grossiers et altérés, quoique certains sont gloméroporphyriques aux bordures. Les apatites sont en corridors, mais aussi disséminées dans la matrice. Il y a peu d'information générale, c'est une dolomie comme à l'habitude. Il y a quelques reliques de grains qui sont translucides.

Textures : Les carbonates détiennent encore leurs clivages. Les apatites sont de taille variable, mais certaines montrent des points triples.

Minéralisation : La pyrite est grossière, idiomorphes par des cubes. Elle suit les corridors d'apatite. Pareil pour les pyrochlores qui sont assez fins, brunâtres, hypidiomorphes dans leur ensemble, mais quelque peu fracturés.

Autres : Peu de minéralisation, mais relation pyro/apatite évidente. Quelques reliques difficiles à identifier.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N03
Métrage	11,7
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite massive sans accessoires

### Description microscopique

Minéralogie : 100% carbonates

Informations générales : La description macroscopique ne se trompait guère. Calcite massive aux grains grossiers aux clivages apparents. L'altération est faible. Il n'y a aucun accessoire, même pas un grain de biotite ou de minéralisation.

Textures : Clivages usuels des carbonates.

Minéralisation : Aucune.

Autres :



### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N04
Métrage	16,7
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Fluide tardif? Altération syénite? Bte+AP+Py. Nada ou bien high-grade..

### Description microscopique

Minéralogie : 68% biotite, 15% apatite, 10% carbonates, 5% pyrite et 2% pyrochlore.

Informations générales : Dominance de la biotite/chlorite. Il semble y en avoir deux générations, l'une à basse biréfringence, extinction roulante, assez grossière tandis que la deuxième est tout le contraire. Or, toutes les biotites sont relativement pâles et certaines montrent une teinte verdâtre. Les apatites et les carbonates sont interstitiels.

Textures : Points triples des apatites très francs où il y a un pyrochlore aux inclusions d'apatite. Les biotites sont équi-granulaires dans la mesure qu'il y a vraiment deux générations.

Minéralisation : La pyrite est de remplissage entre les grains de biotite. Elle suit une orientation. Elle est xénomorphe. Les pyrochlores sont bruns foncés, fins à moyens et de forme variable (xéno à idio). Quelques-uns sont libres dans les carbonates, mais la plupart sont dans l'apatite au contact des biotites. Une faible zonation est visible sur certains. Le phénomène d'altération opaque/remplacement s'observe aussi. Ils ont des inclusions d'apatite par moments.

Autres : Dominée par les micas. Quelques pyrochlores zonés.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N05
Métrage	21,8
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Syénite fraîche

### Description microscopique

Minéralogie : 73% feldspath, 15% biotite, 5% carbonates, 5% pyrite et 2% pyrochlore.

Informations générales : Syénite relativement fraîche. Les feldspaths sont altérés certes, mais montrent des macles intéressantes comparativement aux syénites étudiées. Les feldspaths sont allongés, grossiers, mais ne se retrouvent pas dans une orientation particulière. Les grains de biotite sont démembrés, ils sont foncés et maintenant xénomorphes. Les carbonates sont tardifs, disséminés, mais relativement grossiers.

Textures : Zircons dans les biotites, démembrement des biotites qui peuvent être recollés par le pléochroïsme. Macles visibles, notamment celle de Carlsbad.

Minéralisation : La pyrite est disséminée, moyenne à grossière, hypidiomorphe. Les pyrochlores sont moyens, aussi hypidio à idiomorphes. Ils sont légèrement altérés et fracturés. Ils sont bruns/gris et se retrouvent dans les grains de feldspaths.

Autres : Pyrochlores dans feldspaths.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N06
Métrage	28,3
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite avec amas de biotite et d'apatite

### Description microscopique

Minéralogie : 69% carbonates, 15% pyrite, 10% biotite, 5% apatite et 1% pyrochlore.

Informations générales : Calcite massive aux carbonates peu altérés aux clivages apparents. Les grains sont grossiers. Peu d'accessoire dans la portion calcitique, seulement quelques apatites et de la pyrite disséminée. Or, il y a un amas d'accessoires sur la lame. Il est composé principalement de biotite et de pyrite avec de l'apatite et du pyrochlore. Les biotites sont grossières, montrent un fort pléochroïsme et une certaine zonation, comportement irrégulier. L'apatite a un faible pléochroïsme de biréfringence.

Textures : Certains grains de biotite ont une texture en « givre » comme lorsque l'eau gèle dans une fenêtre. Cette texture est perpendiculaire aux clivages. Ce phénomène est visible sur les grains à l'extérieur du corridor. Il y a de la pyrite dans les biotites et des apatites dans la pyrite.

Minéralisation : La pyrite est xénomorphe, semble être tardive et remplit les interstices du corridor. Quant aux pyrochlores, ils sont très grossiers. Ils sont toutefois fortement fracturés et montrent plusieurs inclusions d'apatite. Ils sont gris/bruns et se retrouvent en plein centre du corridor.

Autres : Zonation dans les biotites. Les pyrochlores semblent avoir été transportés; car ils sont fracturés.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N07
Métrage	29,3
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Contact entre dolomie/syénite fraîche

### Description microscopique

Minéralogie : 35% carbonates, 24% feldspath, 20% biotite, 15% pyrite, 5% apatite et 1% de pyrochlore.

Informations générales : Contact entre carbonates et syénite. La portion carbonatée est massive, quelques carbonates ont des clivages, les grains sont grossiers. Seules quelques apatites s'y retrouvent comme accessoires. L'altération est faible. Le contact est composé de phénocristaux de biotite qui sont zonées et qui possèdent une fort pléochroïsme. Il y a aussi des apatites fracturées et aux multiples inclusions. La pyrite agit comme « filler », elle est xénomorphe. Une légère chloritisation s'observe au pourtour des micas. La bordure du côté syénite montre un front de biotites fines, équi-granulaires et qui possèdent des zircons. Les feldspaths s'observent sous deux sortes : l'une altérée aux textures inexistantes et l'autre non altérée et aux macles très bien définies. Le deuxième type est grossier.

Textures : Les biotites dans le couloir du centre montrent des zonations, celles du bord, plus fines, ont des zircons. Les caractéristiques ne sont pas observées dans l'autre type. Les macles des feldspaths sont bien définies.

Minéralisation : La pyrite est xénomorphe et s'observe tout au long du contact. Quant aux pyrochlores, il y a quelques grains dans le couloir assez grossiers, mais la plupart sont dans la syénite. Les pyrochlores sont assez fins, hypidie à idiomorphes, mais altérés et fracturés. Ils sont gris/bruns.

Autres : Aucun pyrochlore dans les carbonates, seulement dans la syénite. Valider le type sur la cathodoluminescence.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N08
Métrage	34,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	C3A dolomie en amas. Plus ou moins un contact Dol/Calc

### Description microscopique

Minéralogie : 59% carbonates, 20% biotite, 15% apatite, 5% pyrite, 1% magnétite et traces de pyrochlore.

Informations générales : Roche hétérogène. Les carbonates sont de taille et de forme variable, de fins à grossiers aux clivages apparents. Les apatites sont arrondies, aussi de taille variable, généralement disséminées. Les biotites sont très foncées, fracturées, aux multiples inclusions.

Textures : Il semble y avoir un pseudo corridor où de fines apatites suivent une orientation et quelques fines biotites y sont aussi présentes. Quelques biotites montrent un remplacement dans le sens des clivages, notamment par des carbonates. Les apatites sont fracturées.

Minéralisation : La magnétite est en association avec la pyrite. Elle est xénomorphe. La pyrite semble lentement la remplacer, ceci est avancé par la couleur vive en L.R. La pyrite est de forme variable, de xéno à idiomorphe. Les seuls grains minéralisateurs sont dans le coin de la lame où c'est un amas d'accessoires. Les pyrochlores sont fortement altérés et fracturés, quoique grossiers. Ils ne semblent vraisemblablement pas en équilibre.

Autres : Peu de pyrochlore, quelques grains dans l'amas. Ils sont affectés.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N09
Métrage	35,2
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie foliée avec bandes d'accessoires

### Description microscopique

Minéralogie : 67% carbonates, 20% apatite, 6% pyrite, 4% pyrochlore et 3% magnétite.

Informations générales : Dolomie foliée aux corridors multiples d'apatite et d'autres accessoires. Les carbonates sont relativement grossiers et montrent encore des clivages. Les apatites sont fines dans cette roche et se retrouvent majoritairement dans les corridors, très peu dans la matrice.

Textures : Il y a une veine de calcite tardive qui recoupe perpendiculairement la foliation. Elle a de la pyrite xénomorphe sur les bordures.

Minéralisation : La pyrite est de forme et de taille variable, mais suit la foliation. Elle est disséminée. Les pyrochlores sont brunâtres à foncés. Ils ne sont pas bien formés et semblent altérés, peu en équilibre avec le milieu. Il semble y avoir la corrélation habituelle pyrochlore/apatite.

Autres : Les magnétites sont en transformation. Texture de myrmékites. Les pyrochlores sont peu formés et sont altérés, de bruns à foncés, quasi opaques.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N10
Métrage	35,7
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie avec apatites et accessoires

### Description microscopique

#### **\*\* High-grade \*\***

Minéralogie : 50% carbonates, 35% apatite, 10% pyrochlore et 5% pyrite.

Informations générales : Roche fortement altérée ayant une grande proportion d'apatite. Les carbonates sont de taille et de forme variable, certains grains ont encore leurs clivages. Les apatites forment d'épais corridors à partir de grains fins. Ces corridors sont fortement altérés affectant la minéralisation. Il n'y a pas de biotite et ne semble pas y avoir de magnétite, sauf si elle se confond avec les pyrochlores.

Textures : Foliation importante, clivages de certains carbonates, points triples des apatites.

Minéralisation : La pyrite est hypidiomorphe et disséminée. Les pyrochlores sont relativement bien formés, mais sont fortement affectés par l'altération, les fracturant alors. Ils sont assez fins, de couleur brun à opaque. Ça ne semble pas être deux types, mais bien le même, mais à des degrés d'altération différents. Ils sont évidemment dans les corridors d'apatite et non pas dans la matrice.

Autres : Lame high-grade en pyrochlore, mais ils sont altérés et quasi opaques par endroits. Ne semble pas y en avoir plus lorsque l'apatite est rouge, mais elle semble être la raison de l'altération de la roche.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N11
Métrage	39,7
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Foliée avec accessoires, clastes. Calcite dans dolomie. Injection? Crack and seal? À déterminer

### Description microscopique

Minéralogie : 60% carbonates, 25% apatite, 5% pyrite, 5% biotite, 3% inconnu(?) et 2% pyrochlore.

Informations générales : La relation de calcite dans la dolomie ne s'observe pas en lame mince. Ce sont plutôt tous des carbonates grossiers, mais certains avec des clivages épais et d'autres plus fins. La calcite est aussi moins altérée que la dolomie. L'apatite se retrouve sous forme de grains fins en forme de chenaux qui contournent des grains. La biotite est en relation avec les corridors. Il y a peu d'accessoires dans la matrice. En bordure dans un amas d'apatite se retrouve un minéral qui se voit soit en baguette, soit en cube. Il est faiblement jaunâtre. Il m'est inconnu.

Textures : Points triples chez les apatites, clivages pour les carbonates.

Minéralisation : Il y a quelques pyrochlores de taille moyenne et hypidiomorphes dans les corridors d'apatite. Ils sont altérés et montrent des inclusions d'apatite. Outre cette minéralisation habituelle se retrouve deux phénocristaux en présence de pyrite qui montrent une faible zonation. Ils sont de couleur brun foncé, un peu comme les biotites.

Autres : Identifier le minéral inconnu en bordure et en amas. Voir ce qu'est le gros pyrochlore foncé.



### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N12
Métrage	43
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Ajout apatite orangée. Altération de zone, chloritisation

### Description microscopique

Minéralogie : 64% carbonates, 25% apatite, 10% chlorite et 1% pyrochlore.

Informations générales : Roche dominée par les carbonates. Il y a une portion aux carbonates grossiers, mais altérés. Il y a une altération en chenaux de couleur verdâtre, possible de la chlorite. Elle procure une allure sale à la roche. Cette portion contient des grains de pyrite idiomorphes de taille moyenne et d'autres, en plus grande quantité, mais plus fins, dans l'altération. La seconde portion est à granulométrie plus fine, est encore chloritisée, mais a aussi une altération en apatite orangée. Il y a beaucoup de vide.

Textures : Aucune texture apparente. La roche est trop altérée pour en avoir conservé.

Minéralisation : Tel que mentionné, la pyrite est idiomorphe et se retrouve dans les deux portions. Il y en a aussi dans la chloritisation dans la portion plus grossière, mais pas dans le secteur à apatite. Quant aux pyrochlores, des grains fins brun foncé sont dans la matrice à carbonates. Les plus gros sont dans la portion à apatite et se confondent dans l'altération. Ils sont bruns foncé comme la biotite et une faible zonation est observée.

Autres : Visualiser les caractéristiques des pyrochlores à la cathodoluminescence.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N13
Métrage	51,4
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Amas de magnétite semi-massif dans la calcite. Devrait être high-grade, mais rien vu en macro

### Description microscopique

#### **\*\* Possiblement deux types de pyrochlore \*\***

Minéralogie : 40% carbonates, 30% magnétite, 15% biotite, 10% apatite et 5% pyrochlore.

Informations générales : Roche à magnétite semi-massive. Les carbonates sont altérés et seulement un faible clivage est apparent. Les apatites sont principalement en amas ou en veinules tout comme les biotites qui sont bien conservées et qui recoupent la magnétite. La magnétite a des inclusions d'apatite ou de carbonates. Il y a quelques baguettes de chlorite pléochroïques.

Textures : Les carbonates et les biotites montrent des clivages. Les apatites sont équigranulaires.

Minéralisation : La magnétite est en amas. Elle possède des inclusions. Les pyrochlores se retrouvent sous deux formes, l'une assez fine, brunâtre, assez fine, légèrement altérée, principalement vue avec l'apatite. Le second type est grossier, idiomorphe, est zoné et est plutôt gris. Ils montrent des zonations même dans leur biréfringence, caractéristique intéressant considérant qu'ils ne sont jamais biréfringents. Le plus beau est près de la bordure.

Autres : Zapper les grains de pyrochlore, ceux fins dans l'apatite et les grossiers zonés. Les pyrochlores fins ne sont pas biréfringents.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N14
Métrage	53,8
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Amas ponctuels de magnétite dans la calcite

### Description microscopique

Minéralogie : 52% carbonates, 35% magnétite, 5% apatite, 5% biotite, 2% pyrite et 1% pyrochlore.

Informations générales : Matrice de carbonates peu altérés et aux fins clivages. Il y a aussi une veine de carbonates qui traverse la lame aux grains grossiers aux clivages plus importants. La magnétite est en amas, très grossière, a des inclusions de biotite et de carbonates. Les biotites sont idiomorphes à fort pléochroïsme.

Textures : Les biotites et les carbonates montrent de beaux clivages, la magnétite montre aussi ses clivages en L.R.

Minéralisation : La pyrite est xénomorphe, grossière et se retrouve avec la magnétite. Les grains possèdent plusieurs inclusions grisâtres. Les pyrochlores sont brun foncé, quasi opaques, et se retrouvent près de la bordure dans la zone à apatite. Il y a aussi une altération plus élevée dans ce secteur. Il y a aussi un pyrochlore opaque dans la magnétite, il a été entouré. Ce grain est idiomorphe, sans inclusion et semble avoir une zonation externe.

Autres : Aucun pyrochlore dans la matrice, mais quelques-uns dans la petite portion avec apatite. Ils sont brun foncé, quasi opaques. Il y a un grain entouré opaque masqué, pyrochlore caché, dans la magnétite.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N15
Métrage	59,8
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	*Exceptionnel* Magnétite semi-massive dans calcite avec des pyrochlores sodiques(?) verdâtres. Fond bleuté sur la roche

### Description microscopique

#### **\*\* High-grade \*\***

Minéralogie : 35% magnétite, 20% carbonates, 15% apatite, 15% biotite, 8% pyrochlore, 5% chlorite et 2% pyrite.

Informations générales : Matrice de carbonates altérés sans texture. Forte présence d'accessoires. Il y a plus d'apatite dans une portion de la lame et c'est évidemment là où la minéralisation se retrouve. La biotite est majoritairement idiomorphe et montre un fort pléochroïsme. Certains montrent un début de chloritisation. Or, il y a aussi des grains de chorite en baguettes. Les apatites sont plus grossières dans la portion où il y en a moins. En bref, la portion riche en apatite est plus concentrée en apatite, magnétite et en biotite. Les grains sont moins bien formés et ont plus d'inclusions.

Textures : Quelques grains (très peu) ont la texture « givre » précédemment décrite. Les apatites montrent des points triples seulement dans la portion grossière. Elles ont des inclusions partout sur la lame. La portion fine semble être un écoulement.

Minéralisation : Les pyrites sont xénomorphes et sont retrouvées avec les magnétites. Elles n'ont pas d'inclusions. Les magnétites sont grossières et ont des inclusions de carbonates et d'apatite. Elles sont moins détritiques dans la portion plus grossière (celle qui n'est pas riche en apatite). Les pyrochlores se retrouvent majoritairement dans la zone plus fine, quoique quelques grains soient dans la portion grossière (mais toujours avec l'apatite). Ils sont moyens à grossiers, brun foncé, ont un cœur et une zonation externe, sont fortement altérés (affectant leur forme) et possèdent des inclusions d'apatite. Ils sont très nombreux et sont verdâtres à l'œil sur la lame, mais bruns en L.N.

Autres : Le fond bleuté ne peut être expliqué en lame mince. Le pyrochlore est plus riche dans la portion à apatite.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N16
Métrage	68,35
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Apatites orangées en amas dans la dolomie

### Description microscopique

Minéralogie : 60% carbonates, 30% apatite et 10% pyrite.

Informations générales : Roche très homogène et relativement massique qui se compose majoritairement d'une matrice carbonatée aux amas d'apatites. Les carbonates sont relativement grossiers, mais sont altérés et ne montrent pas de clivages. Les apatites sont assez grossières aussi, se retrouvent en amas et non en corridors. Elles sont majoritairement arrondies. Il y a un stringer de très fines pyrites.

Textures : Il y a effectivement des apatites oranges et blanches à l'œil nu. L'apatite orange semble tardive et agit comme altération rendant les apatites altérées d'un gris moyen. Identique pour l'apatite blanche. Ses caractéristiques sont semblables en L.N. Par contre, l'apatite blanche est plutôt sous forme de veinules.

Minéralisation : La pyrite est sous forme de stringer qui semble grossière en L.N., mais qui est composé de plusieurs grains fins arrondis. Il y a aucune minéralisation autre.

Autres : Il y a beaucoup d'apatite, mais aucune minéralisation en Nb même en considérant que les carbonates soient de la dolomie. L'apatitisation orange ne semble donc pas discriminante dans la venue des pyrochlores/columbite. LA CATHODO A MONTRÉ QUE C'EST DE LA CALITE.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N17
Métrage	71,7
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie massive avec veinules. Brèche

### Description microscopique

Minéralogie : 78% carbonates, 15% apatite, 5% pyrochlore(?) et 2% pyrite.

Informations générales : Roche assez simple minéralogiquement. Se compose d'une matrice carbonatée très fortement altérée sans texture à un tel point que les grains ne montrent pas de biréfringence. Les apatites sont très fines et se suivent dans de fins corridors.

Textures : Aucune texture. Les apatites sont en couloirs, sinon la lame est fortement altérée. Il semble y avoir un jus tardif modifiant fortement l'allure initiale de la roche.

Minéralisation : La pyrite est hypidiomorphe, fine à moyenne et est disséminée. Les pyrochlores (si s'en est) sont opaques, mais on décèle une teinte de brun très foncé. Ils sont pour la majorité arrondis et de taille moyenne. Ils se retrouvent évidemment en présence de l'apatite.

Autres : Déterminer quels types de pyrochlores c'est. Ont-ils ces caractéristiques suite à l'altération ou c'est un second type? C'est à voir, ils ne montrent aucune information lors de l'analyse microscopique. C'est peut-être juste des magnétites. Forte altération partout sur la lame. L'allure bréchique en macroscopique donne un bon indice.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N18
Métrage	80,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie avec alt. Chlorite pervasive. Reliques? Fantômes? Pseudomorphes "Valley of Death"

### Description microscopique

Minéralogie : 58% carbonates, 15% pseudomorphes, 15% magnétite, 10% apatite et 2% pyrite

Informations générales : Roche aux allures très complexes. Tout d'abord, il y a un secteur avec peu d'accessoires. Il n'y a pas grand-chose à y décrire. Sinon, l'autre portion est composée d'une matrice carbonatée, toujours et encore fortement altérée sans clivages, mais aux grains grossiers. Or, il y a des secteurs où les carbonates sont très fins et translucides. On dirait des apatites, mais ce sont des carbonates. Ils semblent tardifs. Ils se retrouvent dans le secteur où il y a les pseudomorphes.

Textures : Les points triples des carbonates tardifs et des apatites sont intéressants. Les pseudomorphes s'observent sous deux formes. La première est comme des biotites altérés de couleur grise. On dirait vraisemblablement d'un remplacement. L'hypothèse est que ce sont un stade avancé de la chloritisation, car à l'œil nu, ces grains sont verdâtres et le macroscopique montrait une chloritisation pervasive. Le second type de pseudomorphes, mais un peu plus pâle. Ils sont en œillets.

Minéralisation : Quelques grains de pyrite xénomorphes, probablement tardifs. La magnétite est grossière, mais souvent détritiques considérant la gueule altérée de la roche. Quelques fines inclusions d'apatite et de carbonates. Aucune minéralisation en Nb. Louis-Mathieu disait donc vrai avec son « Valley of Death »

Autres : Aucune minéralisation. Plusieurs grains fantômes, probablement en stade ultime d'altération. La roche semblait chloritisée, mais il n'y avait pas forcément de chlorite sur la lame. On dirait un remplacement, car on reconnaît la forme des micas. L'autre type de pseudomorphe m'est inconnu.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N19
Métrage	94,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Beaux amphiboles, nommée la "Valley of Death"

### Description microscopique

Minéralogie : 45% carbonates, 20% pseudomorphes, 15% apatite, 15% magnétite, 3% chlorite et 2% pyrite.

Informations générales : Tout comme N18, la roche a une matrice carbonatée et l'on observe aussi une deuxième génération de carbonates très fins arrondis non altérés qui ont l'allure d'apatite. Les apatites et les magnétites ont les mêmes caractéristiques. C'est essentiellement la suite, mais il y a toutefois des particularités. Il y a maintenant des grains de biotite et d'autres de chlorite d'un vert très vif. Les pseudomorphes que j'assignais à des micas sont de moins en moins présents et ceux qui étaient en œillets sont plus colorés, d'un brun pâle. Ils sont l'air moins altérés. En macroscopie, ils étaient décrits comme des amphiboles, ce qui pourrait être possible.

Textures : Identiques que N18. Certains grains de magnétites montrent des ouvertures qui ont été remplies par des carbonates.

Minéralisation : Pyrite xénomorphe disséminée. Les magnétites sont tout aussi détritiques et en morceaux avec des inclusions d'apatite et de carbonates. Aucune minéralisation en Nb.

Autres : Voir si l'on peut identifier les pseudomorphes. Aucun grain minéralisateur.



### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N20
Métrage	100,6
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie massive sans accessoires. Zone transitionnelle dol/calc

### Description microscopique

Minéralogie : 98% carbonates et 2% apatite.

Informations générales : Roche massive, homogène et composée à quasi entièreté de carbonates. Il y a quelques fins filons d'apatite rouge. Il n'y a pas de grain d'apatite. Il y aussi 2-4% de vide qui n'a pas été inclut dans la minéralogie. Les carbonates sont grossiers, altérés, mais on décèle un fin clivage.

Textures : Aucune texture.

Minéralisation : Aucune minéralisation.

Autres : Plain and simple. Carbonates massifs.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N21
Métrage	106,7
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Veines/fragments avec apatite rouge, peut-être des amphiboles et de la magnétite

### Description microscopique

Minéralogie : 61% carbonates, 25% apatite, 10% pseudomorphes, 2% pyrite et 2% magnétite.

Informations générales : Ressemble un peu à N18-N19, mais retour à des apatites plus grossières et moins affectés, à une diminution drastique de la quantité de magnétite et la présence de pseudomorphes mieux formés. Les pseudomorphes s'observent dans la portion aux carbonates très fins et arrondis (non altérés, ressemblent à des apatites) et sont gris verdâtres. L'on y perçoit toutefois la forte altération. Il y a aussi les reliques de micas qui sont carbonatisés.

Textures : Seulement spécifier que la portion de carbonates fins et où se retrouvent les reliques/pseudomorphes ressemblent à une veine, une brèche ou un corridor. Dans l'autre portion où les carbonates sont fortement altérés et que les apatites sont grossières, il y a aussi des veinules d'apatite rouge. Il n'y a toutefois aucune minéralisation rattachée à celle-ci.

Minéralisation : Pyrite xénomorphe disséminée, pareil pour la magnétite. Aucune minéralisation en Nb.

Autres : Déterminer les pseudomorphes, est-ce des amphiboles?

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N22
Métrage	112,7
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	C3C calcite foliée riche en carbonates

### Description microscopique

#### **\*\* Mid-grade \*\***

Minéralogie : 60% carbonates, 15% apatite, 10% pyrite, 6% magnétite, 5% pyrochlore, 2% biotite et 2% chlorite.

Informations générales : Roche très simple minéralogiquement, homogène. Elle consiste à une matrice carbonatée aux grains grossiers et aux clivages développés. Il y a une foliation qui se caractérise par de faibles couloirs aux apatites fines et à d'autres accessoires. Tous les minéraux suivent cette orientation; biotite, magnétite, pyrite, chlorite, pyrochlore.

Textures : Foliation importante, plusieurs fines lamelles. Certains carbonates ont des clivages « griffe d'ours » qui se composent de triangles allongés.

Minéralisation : La pyrite est moyenne, hypidiomorphe et disséminée. La magnétite et le pyrochlore sont tous deux assez fins, autant que l'apatite. Les pyrochlores sont quasi opaques, mais on décèle une faible teinte brunâtre. Ce qui les différencie est la L.R. où le gris des pyrochlores est plus foncé et plus mât. Les deux minéraux sont hypidiomorphes avec quelques grains arrondis.

Autres : Il y a beaucoup de grains de pyrochlores, mais ils sont fins ce qui ne donne pas un gros pourcentage. Il serait intéressant de les analyser et voir leur type. À quoi est due leur teinte opaque?

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N23
Métrage	115,1
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Syénite fortement altérée

### Description microscopique

Minéralogie : 70% biotite/chlorite, 20% feldspaths, 5% carbonates, 3% apatite et 2% pyrochlore.

Informations générales : La roche peut sembler fortement altéré en macroscopique, mais la lame mince montre une roche entièrement transformée en micas avec quelques restants de feldspaths. La roche ne semble pas altéré au sens strict, mais évidemment qu'elle l'est considérant l'hydratation et la transformation minéralogique. Les micas sont équigranulaires, assez grossiers et montrent des clivages intéressants ainsi que des zircons. Les apatites et les carbonates sont majoritairement en amas concentriques disposés aléatoirement sur la lame. Ils agissent comme remplissage. Les clastes de feldspaths sont des agglomérations de grains aux macles visibles.

Textures : Il y a une veine qui traverse la roche, elle est composée de carb/apatite/feldspaths.

Minéralisation : La minéralisation se retrouve dans des grains brun foncé idiomorphes qui se retrouvent exclusivement dans la biotite. Certains sont zonés. Il y a aussi des grains gris pâle qui sont dans la matrice ou dans les biotites qui sont xéno- à hypidiomorphes et qui sont fracturés. Ils ont une biréfringence moyenne, il serait intéressant de voir si ce sont des pyrochlores. C'est ce que je croyais au départ.

Autres : Vérifier les pyrochlores observés et identifier les grains grisâtres que je croyais être de la minéralisation au départ.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N24
Métrage	120,9
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	C3A dolomie foliée

### Description microscopique

#### **\*\* Mid-grade \*\***

Minéralogie : 70% carbonates, 15% apatite, 5% pyrite, 5% magnétite et 5% pyrochlore.

Informations générales : Ressemble à N22, sauf qu'elle est composée de dolomie au lieu de calcite. Il n'y a pas de biotite/chlorite et il est beaucoup plus dur de différencier la magnétite de la minéralisation en Nb. Ainsi, c'est une roche très simple minéralogiquement, homogène. Elle consiste à une matrice carbonatée aux grains grossiers et aux fins clivages. Il y a une foliation qui se caractérise par de faibles couloirs aux apatites fines. Tous les minéraux suivent cette orientation; magnétite, pyrite et pyrochlore.

Textures : Foliation importante, plusieurs fines lamelles. Les apatites sont en amas ou en veinules.

Minéralisation : La pyrite est moyenne, hypidiomorphe et disséminée. La magnétite et le pyrochlore sont tous deux assez fins, autant que l'apatite. Les pyrochlores sont quasi opaques, mais on décèle une faible teinte brunâtre. Les deux minéraux sont hypidiomorphes avec quelques grains arrondis.

Autres : Il y a beaucoup de grains de pyrochlores, mais ils sont fins ce qui ne donne pas un gros pourcentage. Il serait intéressant de les analyser et voir leur type. À quoi est due leur teinte opaque? La magnétite est peu présente si je ne me trompe, les opaques correspondent plus à des pyrochlores. Comparer avec N22.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N25
Métrage	122,3
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	C3A dolomie massive

### Description microscopique

Minéralogie : 84% carbonates, 10% apatite, 3% pyrite et 3% chlorite.

Informations générales : Roche très simple, majoritairement composée de carbonates altérés, clivages assez fins. Les apatites ne se retrouvent pas sous forme de veinules/corridors, mais sont disséminées. Elles sont arrondies, assez fines. La chlorite est aussi disséminée. Il y a donc peu d'information à y soutirer.

Textures : Quelques veinules d'apatite rouge ou blanche en altération, somme toute mineures.

Minéralisation : Pyrite hypidiomorphe disséminée.

Autres : Aucune minéralisation en Nb.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N26
Métrage	125,6
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Veine de quartz décimétrique dans une dolomie. Silicification

### Description microscopique

Minéralogie : 65% carbonates, 25% quartz, 5% apatite, 3% chlorite et 2% pyrite.

Informations générales : Carbonates avec une veine de quartz. Le quartz aurait bien pu être décrit comme de l'apatite; mêmes caractéristiques optiques. La forme plus franche donne toutefois un bon indice. Le quartz s'observe comme des amas dans un corridor entouré de carbonates. Une observation intéressante se fait à 10x où l'on voit que les carbonates sont le résultat de plusieurs petits grains idiomorphes qui résultent à une texture sale à faible grossissement.

Textures : Points triples très évidents chez les grains de quartz. La multitude de grains de carbonates très fins et idiomorphes qui donne l'allure sale est aussi intéressant.

Minéralisation : Pyrite disséminée. Aucune autre minéralisation. Pas d'apatite, pas de pyrochlore comme on dit.

Autres : Aucune minéralisation, aucune apatite. Lien à faire?

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N27
Métrage	130,2
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie avec des amas à déterminer

### Description microscopique

Minéralogie : 80% carbonates, 9% magnétite, 5% apatite, 3% pyrite, 2% biotite et 1% inconnu.

Informations générales : Roche dominée par les deux formes (et non types) de carbonates retrouvés dans le secteur, soit les grains grossiers sans texture altérés et ceux plus fins, en amas, non altérés qui semblent tardifs. Même les amas de carbonates sont altérés, mais elle est superficielle, comme quoi ce ne sont pas les carbonates eux-mêmes qui sont altérés, mais une altération ajoutée. On remarque des amas de carbonatites fins aux bordures noires qui rappellent des reliques.

Textures : Matrice de carbonates altérée avec des phénocristaux aux clivages bien formés éparpés et d'autres carbonates qui se retrouvent sous forme d'amas composés de grains fins. Donc 3 différentes visions des carbonates. Les grains rouges sont souvent en présence d'apatite, quoiqu'il n'en ait pas beaucoup.

Minéralisation : Pyrite disséminée, xénomorphe. Les magnétites sont fracturés ici, intacts là. Il y en a dans la biotite prenant le sens des clivages. Il n'y a pas de minéralisation en Nb, quoiqu'il soit important d'identifier le grain brun foncé/rouge vin qui se retrouve à moins de 1%.

Autres : Identifier les grains rouges/bruns (entouré) et voir si ce sont vraiment des reliques carbonatitées.



### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N28
Métrage	131,1
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie avec des amas à déterminer, mais l'altération est plus présente

### Description microscopique

Minéralogie : 72% carbonates, 15% apatite, 8% chlorite, 4% magnétite, 1% pyrite et traces inconnu.

Informations générales : Carbonates altérés sans textures comme matrice avec les accessoires disséminés sur la lame. Les chlorites sont grossières, hypidiomorphes, mais démembrées. Les apatites sont distribuées aléatoirement formant de pseudo couloirs. L'altération est assez forte, notamment où se situe l'apatite blanche qui provoque un effet « sale » sur la lame.

Textures : Aucune texture intéressante. Il y a encore les amas de carbonates fins qui ressemblent en L.N. à des apatites. Ils sont inaltérés en surface, mais ont une altération superficielle qui se traduit par des baguettes noires. Attention toutefois! Ces baguettes semblent être reliées à ces carbonates. Sont-ils synchrones?

Minéralisation : Pyrite xénomorphe disséminée. La magnétite est xénomorphe aussi, mais certains grains montrent des inclusions plus vives. Ce serait intéressant de savoir si c'est un minéral titanifère ou niobien.

Autres : Le grain entouré en bordure montre une magnétite aux inclusions d'un second opaque. Voir s'il y a des informations à y soutirer en cathodoluminescence, sinon au MEB.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N29
Métrage	137,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie verdâtre. Quelle est l'altération?

### Description microscopique

Minéralogie : 68% carbonates, 25% magnétite, 5% chlorite et 2% apatite.

Informations générales : Roche hétérogène au premier abord, mais simple minéralogiquement. On parle d'une matrice carbonaté où se retrouve des amas de grains de calcite fins aux clivages apparents au pourtour des grains de magnétite de taille variable. Les magnétites sont hypidiomorphes, souvent fracturées, mais il est possible de les rapiécer. Les chlorites et les apatites sont dispersées aléatoirement.

Textures : Les carbonates altérés sont très fortement affectés et les grains sont très fins. Les amas semblent être le résultat d'une altération de minéraux et ce qui est observé sont les reliques. La magnétite semble être synchrone avec le second type de carbonates, celui inaltéré.

Minéralisation : Aucune pyrite, ni pyrochlore/columbite. La magnétite est de taille et de forme variable. Elles sont aussi fracturées par les carbonates qui les entourent en plus d'en avoir des inclusions.

Autres : Les magnétites sont manifestement en relation avec les carbonates frais plus fins. Il y a peu d'apatite et aucun minéral porteur de Nb par le fait même.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N30
Métrage	143,6
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie typique du nord avec des bandes mélanocrates avec acc++. Pourquoi est-ce foncé?

### Description microscopique

Minéralogie : 50% carbonates, 25% apatite, 15% magnétite, 6% biotite et 4% pyrite.

Informations générales : Matrice carbonaté habituelle aux grains grossiers, altérés et sans textures. La lame se montre comme deux corridors importants parallèles. Dans ces corridors se retrouvent une forte présence d'apatite + biotite + magnétite.

Textures : Foliation induite entraînant les accessoires. Les apatites montrent des points triples. Il y a aussi une altération inconnue qui tapisse les corridors.

Minéralisation : Pyrite fine à moyenne idiomorphe et disséminée. Les magnétites sont de taille et de forme variable. Elles sont souvent légèrement fracturées. Aucune minéralisation en Nb observée.

Autres : Aucune minéralisation perçue. Ce sera de confirmer en cathodo, peut-être ressemble-t-elle trop à la magnétite, mais j'en doute.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N31
Métrage	154,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Contact amas magnétite et reliques (amph?) et dolomie pseudomorphe visibles(?)

### Description microscopique

Minéralogie : Portion dolomitique : 70% carbonates, 20% apatite, 6% magnétite et 4% chlorite.

Portion amas : 54% carbonates, 30% magnétite, 10% apatite, 5% chlorite et 1% inconnu.

Informations générales : La portion dolomitique montre une roche de ce qui a de plus normal. Ce sont des carbonates altérés sans texture comme matrice avec une faible foliation qui se traduit par des apatites suivant une orientation préférentielle. Les grains de magnétite et de chlorite suivent ce sens. Les apatites sont arrondies ou allongées. Il y a des carbonates de seconde génération de forme variable. La magnétite est hypidiomorphe.

La portion en amas se traduit par des carbonates et des magnétites grossières. Il y a plusieurs, pratiquement la moitié, reliques d'un minéral inconnu qui se retrouve sous forme fibreuse à grains fins. Le tout a été transformé en carbonates.

Textures : Aucune texture intéressante. Le contact est une trainée de carbonates assez frais.

Minéralisation : Les magnétites sont de forme et taille variable, mais sont définitivement plus grossières dans la portion en amas. Elles possèdent des inclusions d'apatite et de carbonates. Il y a certains petits grains brun/rouge dans la portion à amas. Il en a aussi un entouré dans la portion dolomitique. Ce serait de voir s'ils sont minéralisés en Nb.

Autres : Vérifier ce que sont les grains brun/rouge.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N32
Métrage	155,3
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Contact dolomie/éponte AP+ (hydro?)

### Description microscopique

Minéralogie : 68% carbonates, 15% apatite, 10% magnétite, 5% biotite et 2% pyrite.

Informations générales : La matrice se compose de carbonates altérés, mais qui montrent des clivages. La roche est foliée. Les accessoires, notamment la biotite, la magnétite et l'apatite, suivent un écoulement. Tous grains sont relativement fins, équi-granulaires (pour chaque type) et hypidiomorphe. Deux générations de carbonates sont encore présentes, l'une altérée et une arrondie, assez fine qui ressemble à des apatites. La seconde n'est pas altérée. Il y a une portion apatitisée par de l'apatite rouge. En lame mince, c'est gris. Rien à décrire.

Textures : Peu de texture, roche assez altérée. Il y a une foliation. Sinon, les carbonates de seconde génération sont aussi présents dans la portion apatitisée.

Minéralisation : La pyrite et la magnétite sont xéno- à hypidiomorphe et sont de taille variable.

Autres : Aucune minéralisation.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N33
Métrage	155,4
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Éponte AP+ et veine C2S qui devrait être tardive

### Description microscopique

Minéralogie : 65% carbonates, 30% apatite et 5% pyrite.

Informations générales : Roche très simple minéralogiquement. Se compose d'une portion massive de carbonates relativement fins, mais peu altérés. Il y a des pyrites idiomorphes et de fins grains d'apatite blanche (s'observe comme de la saleté noire en L.N.). Cette portion montre une faible foliation.

La porte fortement apatitisée est rougeâtre, mais n'apporte aucune minéralisation. Ça ressemble à une roche fortement altérée en L.N.

Textures : La faible foliation et les carbonates microgrenus sont les deux seules textures visibles.

Minéralisation : La pyrite est de taille variable, mais plus grossière au contact. Elle est idiomorphe, certains cubes sont observés. Des inclusions de carbonates s'y retrouvent. Pas de magnétite, ni de pyrochlore.

Autres : L'apatite rouge n'est pas gage de minéralisation.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N34
Métrage	158,7
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie avec amas d'apatites blanches avec accessoires, magnétite et columbite(?)

### Description microscopique

#### **\*\* Retour de la minéralisation \*\***

Minéralogie : 72% carbonates, 9% apatite, 5% magnétite, 5% biotite, 5% pyrite, 3% columbite et 1% magnétite.

Informations générales : Roche à carbonates grossiers, altérés et sans texture. Les apatites sont toutes arrondies, certaines sont isotropes, un comportement incompris. Les carbonates sont encore divisés en deux générations, la seconde ressemblant beaucoup à des apatites. Il y a deux corridors où se retrouvent la majorité des accessoires comme la biotite, la magnétite et la minéralisation. Ces corridors semblent être riches en apatite, mais non, c'est des carbonates. La biotite est idiomorphe et montre un fort pléochroïsme.

Textures : Les amas ressemblent à ceux d'apatite généralement observés, mais c'est des carbonates. Les magnétites, les biotites et les columbites y cohabitent. Les carbonates ont des points triples.

Minéralisation : Pyrite hypidio- à idiomorphe disséminée dans la matrice. Quelques grains de magnétite dans les amas, ils sont assez grossiers et ont des inclusions de carbonates tout comme les grains minéralisés. La minéralisation se retrouve dans les amas, ils sont hypidiomorphes, quasi bien formés. Ils semblent être altérés. Ils sont brun foncé, quasi opaque (certains sont limites). Valider si ce sont des columbites ou des pyrochlores.

Autres : Investiguer davantage sur les apatites isotropes et valider que le retour de la minéralisation correspond à de la columbite. Aucune relation columbite/apatite.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N35
Métrage	162,2
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie foliée typique du nord

### Description microscopique

#### **\*\* Mid-grade \*\***

Minéralogie : 80% carbonates, 9% apatite, 4% biotite, 3% columbite, 3% pyrite et 1% magnétite.

Informations générales : Roche à dominance de carbonates. Beaucoup de caractéristiques semblables à N34. Les carbonates en matrice sont grossiers, montrent quelques clivages. Il y en a aussi inaltérés de seconde génération qui forme des amas. C'est là que se retrouve la minéralisation. On dirait que les amas d'apatite du sud porteurs de minéralisation ne sont plus présents. Les apatites sont arrondies et éparées. La magnétite est moyenne, mais il n'y en a peu. Une altération en baguettes/fibres affecte les amas.

Textures : Semblable à N34.

Minéralisation : La pyrite est de fine à moyenne, d'hypidio- à idiomorphe et est disséminée. La magnétite est xénomorphe, assez fine aussi. Quant à la columbite, les grains sont majoritairement fins, ressemblent à des amas de saleté brun très foncés. Des grains plus grossiers sont cubiques, mais l'on voit qu'ils ont été affectés par le transport.

Autres : Encore quelques grains minéralisés dans les amas de carbonates frais. La théorie est que la minéralisation a été transportée considérant leur tronche altérée et souvent démembrée. Il n'y a pas de lien direct avec l'apatite comme dans la portion du sud.



### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N36
Métrage	172,6
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Contact dolomie/calcite avec apatites orangées

### Description microscopique

Minéralogie : 55% carbonates, 30% apatite, 6% pyrite, 4% magnétite, 4% biotite et 1% columbite.

Informations générales : Carbonates altérés grossiers aux fins clivages. La roche n'est pas à proprement dit foliée, mais il y a une orientation préférentielle. Les apatites sont arrondies, certaines sont isotropes. Il n'y a pas de carbonate de seconde génération aux allures d'apatite sur la lame. La biotite et la magnétite sont hypidiomorphes. Ils ont des inclusions de carbonates. C'est un retour aux lithologies riches en apatite.

Textures : Il y a quelques phénocristaux de carbonates aux clivages apparents. Il y a des secteurs apatitisés (gris sale).

Minéralisation : Plusieurs grains de pyrites sont idiomorphes, sinon ils le sont presque. Ils sont de taille variable. Il y a relation entre pyrite et magnétite par endroits. La magnétite est assez grossière. Les grains minéralisés observés sont bruns foncé, quasi opaques, ont une forme erratique, sont altérés et ressemblent à une biotite mal au point et à une apatitisation. C'est à voir si se sont véritablement des columbites.

Autres : Vérifier la présence de columbite.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N37
Métrage	181,9
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite avec amas de magnétite. Veinules d'apatites (rouges=hydrothermales?)

### Description microscopique

Minéralogie : 64% carbonates, 15% magnétite, 10% apatite (altération), 5% apatite (grains), 5% pyrite et 1% columbite.

Informations générales : La roche est fortement altérée, notamment par l'apatitisation qui se traduit par des chenaux foncés qui interdigitent la roche. Les carbonates sont donc affectés, sauf pour une seconde génération qui forme des veinules. Les apatites sont quasi isotropes. Les magnétites étaient grossières, mais sont démembrées.

Textures : R.A.S. Orientation préférentielle des apatites suivant le cours de l'apatitisation, sinon pas de texture intéressante.

Minéralisation : La pyrite est hypidiomorphe, allongée et disséminée. Les magnétites sont grossières, mais démembrées. Elles ont des inclusions de carbonates. Les grains minéralisés, probablement des columbites, sont moins altérés sur cette lame. Certains sont encore difformes et très foncés, mais ceux entourés montrent même des zonations. Ils sont beiges et sont idiomorphes.

Autres : Regarder à la cathodoluminescence et au MEB la composition des grains entourés qui se retrouvent sur la bordure de la lame.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N38
Métrage	184,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite avec amas de magnétite. Ressemble à une dislocation

### Description microscopique

#### **\*\* Columbites zonées \*\***

Minéralogie : 70% carbonates, 16% apatite, 8% magnétite, 3% pyrite et 3% columbite.

Informations générales : Les carbonates de la matrice sont quelque peu altérés, mais montrent tout de même des clivages. Leur forme est bien définie. Il y a des secteurs plus altérés où des reliques semblent persister et d'autres portions qui sont caractérisées par des veinules de carbonates frais. Les apatites sont en amas ou en chenaux (à la suite) et plus de la moitié sont isotropes.

Textures : Rien diffère des lames identiques, les points triples des apatites sont présentes. Il y a une altération secondaire par endroits.

Minéralisation : La pyrite est disséminée et quasi idiomorphes. Les magnétites ont des tailles variables, mais certains grains sont très grossiers et bien conservés. Ils montrent une zonation externe d'un opaque plus vif. Il serait intéressant de valider la composition. Quant aux columbites, il y en a une dizaine de grains sur la lame. Certains sont assez fins, mais d'autres sont relativement grossiers et montrent des zonations intéressantes. Il y en a avec des inclusions d'apatite. Ils sont brunâtres, mais tendent vers le beige. Ils sont plus frais que dans les lames précédentes si se sont réellement les mêmes minéraux.

Autres : Deux particularités très importantes : il y a des columbites zonées et les magnétites, aussi très bien développées, montrent une zonation externe d'un second opaque. Trois grains de columbites ont été encerclés.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N39
Métrage	186,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Comme N38, mais plus fin. Probablement high-grade

### Description microscopique

Minéralogie : 58% carbonates, 20% magnétite, 20% apatite et 2% columbite.

Informations générales : Roche très semblable à N38. Il est vrai que la granulométrie est plus fine. Les magnétites sont moins grossières. La minéralogie varie quelque peu, il y a plus d'apatite et pas de pyrite. Cela dit, les apatites sont encore à dominance isotropes.

Textures : Comme N38.

Minéralisation : La magnétite est plus fine, mais certains grains sont quand même grossiers. La zonation des magnétites est moins évidente, mais certains grains, les plus gros, la montre encore. Quant aux columbites, il y a peu de grains, mais un amas de 3 a été entouré. Les zonations sont plus difficile à voir, mais une luminosité maximale permet de la déceler. Il faut dire qu'ils sont plus altérés et paraient démembrées.

Autres : Valider la présence et la composition des columbites tout comme N38. Trois grains ont été entouré dans un même amas.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N40
Métrage	193,6
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie foliée typique avec bandes riches en accessoires

### Description microscopique

#### **\*\* Columbites zonées \*\***

Minéralogie : 60% carbonates, 25% apatite, 8% magnétite, 3 biotite, 3% columbite et 1% pyrite.

Informations générales : Les carbonates sont peu altérés, ils ont seulement une teinte grisâtres. Les clivages sont un peu visibles. L'apatite est de retour à près de 25%, mais la moitié sont isotropes, un caractère encore incompris. Elle se retrouve en amas ou en fins corridors, mais aussi disséminée dans la lame. La biotite est disséminée au même titre que la pyrite. La magnétite ne montre plus la zonation externe.

Textures : Certains carbonates sont moins altérés, possiblement de seconde génération. Ils ont des points triples.

Minéralisation : Le gros de la minéralisation se situe sur le même axe que les grains entourés. Il y en a d'autres sur la lame, mais les principaux sur dans l'amas d'apatite. La magnétite est aussi plus présente dans ce secteur. Ils sont brunâtres, sont souvent idiomorphes et montrent de superbes zonations à luminosité maximale. Les magnétites sont arrondies et possèdent beaucoup d'inclusions.

Autres : Les columbites sont très bien formées et ont des zonations très intéressantes. Il est aussi suggéré de regarder le caractère des apatites isotropes.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N41
Métrage	200,2
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie foliée typique avec columbite disséminée en amas ? Ils sont fins, libre dans les carbs. Pas d'apatite

### Description microscopique

Minéralogie : 85% carbonates, 15% apatite en altération et des traces en biotite, pyrite et en columbite.

Informations générales : Lame très décevante, rien à voir avec la description macroscopique. Elle se résume à des carbonates altérés sans accessoires mis à part des traces de biotite, de pyrite et supposément de la columbite altérée. Il y a un corridor au centre d'apatite blanche qui se traduit par une belle altération grise non attrayante.

Textures : R.A.S.

Minéralisation : R.A.S.

Autres : Voir si la cathodo pourrait montrer des particularités, mais la lame semble dénudée de toute caractéristique.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N42
Métrage	202,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Claste de dolomie minéralisé dans un C2S (C3N) avec bordures d'apatites rouges

### Description microscopique

Minéralogie : 75% carbonates, 11% apatite, 10% apatite (altération), 3% chlorite et 1% pyrite.

Informations générales : Roche très simple minéralogiquement. Les carbonates sont très bien formés et sont peu altérés. Ils ont une allure « bande dessinée » assez difficile à décrire. Par contre, ils ont les bordures altérées comme du givre sur une fenêtre l'hiver. Ils ne sont pas altérés sinon, mais ne montrent pas de clivage non plus. Les chlorites sont grossières et sont en transformation. Il y a une apatitisation blanchâtre sur la bordure de la lame et une rouge, mais en moins grande quantité.

Textures : Points triples des apatites qui sont souvent isotropes soit dit en passant.

Minéralisation : Il n'y a pas de minéralisation. Il y a toutefois un grain étrange dans le coin de la lame. Il est fortement altéré au centre, mais montre une bordure idiomorphe. Probablement de la magnétite.

Autres : Vérifier le grain entouré au coin de la lame.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N43
Métrage	205,7
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie foliée avec accessoires grossiers

### Description microscopique

#### **\*\* Preuve de la transformation magnétite -> pyrite \*\***

Minéralogie : 74% carbonates, 10% apatite (grains), 10% apatite (altération), 3% pyrite, 2% magnétite et 1% columbite.

Informations générales : L'apatite est seulement retrouvée en veinules. Dans l'apatitisation blanche, les apatites translucides sont beaucoup plus fines. Ce phénomène n'est pas vrai pour les secteurs à apatite rouge.

Textures : Quelques carbonates ont le cœur inaltéré.

Minéralisation : La magnétite est xénomorphe, assez fine. La pyrite est souvent idiomorphe. Seulement quelques grains de columbite sont observés. L'un (entouré) est idiomorphe et montre une faible zonation. Il est bien évidemment dans une veinule d'apatite.

Autres : Il y a un grain de columbite idiomorphe entouré. C'est l'un des seuls observé. Un autre grain est entouré montrant la transformation magnétite en pyrite. C'est une pyrite, mais avec les textures d'une magnétite.



### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N44
Métrage	207,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Veine d'apatite orangée. C'est théoriquement la roche la plus typique de la mine, mais attention high-grade ici!

### Description microscopique

**\*\* Very high-grade \*\***

Minéralogie : 69% carbonates, 20% apatite, 10% opaques (columbite/magnétite) et 1% pyrite.

Informations générales : Carbonates grossiers, contacts non visibles par l'altération. Les apatites sont en cumulats, elles sont très fines, mais forment des grains plus gros (mais restent assez petits). Les apatites forment deux chenaux principaux où se retrouve la minéralisation. Aucun autre accessoire.

Textures : Quelques apatites sont arrondies et de taille moyenne, mais la majorité sont très fines et forment des cumulats.

Minéralisation : 1% de pyrite disséminée de forme cubique. Il y a aussi un peu plus de 10% d'opaques idiomorphes pour la plupart qui ressemblent fortement à des minéraux de Nb. Or, ils sont opaques, une caractéristique pas encore observée dans la portion nord. La cathodoluminescence et le MEB pourrait informer davantage sur ces grains. Ils sont fins et sont, pour la totalité, présents dans l'apatite orangée. Plusieurs ont des inclusions de carbonates, mais que très peu en ont d'apatite.

Autres : Les columbites sont dans les couloirs d'apatite orange, sont idiomorphes, ont des inclusions exclusivement de carbonate et sont opaques. À valider!! C'est du high-grade.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N45
Métrage	208
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie standard, hématisée

### Description microscopique

#### **\*\* High-grade \*\***

Minéralogie : 65% carbonates, 20% apatite, 10% columbite et 5% pyrite.

Informations générales : Roche homogène à dominance de carbonates altérés, probablement à l'hématite, car c'est ce qui s'observait en macroscopique. En L.N., c'est une altération grisâtre. Les apatites sont très fines comme dans N44. Elles forment des cumulats. Ces cumulats se retrouvent majoritairement dans des corridors. C'est aussi là qu'est la grande partie de la minéralisation. Plusieurs carbonates montrent des cœurs inaffectés.

Textures : Quelques apatites sont arrondies et de taille moyenne, mais la majorité sont très fines et forment des cumulats. C'est sensiblement les mêmes observations que N44.

Minéralisation : La pyrite est grossière, intacte et idiomorphe. Les opaques sont aussi pour la majeure partie idiomorphes, assez fins. Ce sont possiblement des pyrochlores/columbite.

Autres : Vérifier les opaques et les comparer à N44. Ils devraient être identiques.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N46
Métrage	209,1
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Amas de columbite avec apatite orangée. Encaissant et C2S se mélangent

### Description microscopique

Minéralogie : 60% carbonates, 31% apatite, 5% pyrite et 4% columbite.

Informations générales : Les carbonates sont généralement bien conservés, quoique altérés, sauf dans les portions d'écoulement où il y a une forte altération, possiblement de l'apatite blanche, qui surplombe des glomérophyres arrondis d'apatite. Les apatites sont très fines et xénomorphes. Deux choix s'opposent : soit ce sont des amalgames d'apatite qui forment des grains grossiers lors du déplacement, soit ce sont des reliques de minéraux qui ont été transformés en apatite.

Textures : La texture en chenal, les glomérophyres et l'apatitisation locale sont les principales textures.

Minéralisation : La pyrite est grossière et hypidiomorphe. Elle semble suivre la foliation induite par l'écoulement d'apatite. Les columbites sont de taille et de forme variable. Les plus grossières (près de la bordure droite) sont grossières et idiomorphes. Les plus petites ont des formes irrégulières. Dans tous les cas, les grains sont opaques.

Autres : Vérifier que les petits opaques de forme irrégulière sont aussi des columbites. Voir si les grosses ont des zonations où des inclusions d'importance.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N47
Métrage	212,3
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie de type C2 environ avec apatitites oranges et rouges. Couleur grisâtre

### Description microscopique

#### **\*\* High-grade \*\***

Minéralogie : 55% carbonates, 25% apatite, 10% pyrite et 10% columbite.

Informations générales : La matrice est carbonatée, mais est à grains fins, est peu altérée et les carbonates montrent des clivages. Les apatites sous forme de grains sont limitées, il y en a quelques-unes qui forment des amas de grains fins tout comme N46. Ces amas se retrouvent dans le jus apatitique. La majorité de l'apatite est comptée comme altération rouge.

Textures : L'altération apatitique, qu'elle soit rouge ou blanche, forme des chenaux dans la roche induisant une faible foliation. Les carbonates sont fins, les apatites encore plus et la minéralisation circulent dans cet axe.

Minéralisation : La pyrite est de taille et de forme variable. La columbite pourrait fortement être mélangée avec la magnétite par son opacité. Elle est de taille moyenne, les grains sont généralement équi-granulaires, La columbite est altérée et la plupart des grains montrent des inclusions de carbonates ou de vide.

Autres : Lame high-grade où la minéralisation est disséminée dans la lame et non pas seulement avec les apatites, mais les carbonates sont récents. Le tout est possiblement arrivé lors d'un même épisode.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N48
Métrage	221,3
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Veine d'apatite rouge avec minéraux d'ETR. Veine de C2

### Description microscopique

Minéralogie : 60% carbonates, 30% apatite, 5% inconnu(?), 2% pyrite, 2% chlorite et 1% columbite.

Informations générales : Roche en deux portions. La première est composée de carbonates de taille variable, inaltérés, mais avec peu de textures. La seule particularité est la présence de pseudomorphes grossiers un peu verdâtres. Ils sont fortement altérés. Aucune idée quel est ce minéral. La seconde portion est un corridor d'apatite rouge. Ce sont des carbonates altérés et un flux d'apatitisation important. Quelques grains de columbite beiges ont été observés, mais sans plus. Ce secteur ne comporte pas de caractéristiques non plus.

Textures : R.A.S.

Minéralisation : La pyrite est idiomorphe et disséminée. La columbite se retrouve seulement dans l'apatitisation et est beige. Elle est fracturée et altérée. Un grain a été entouré.

Autres : Peu de columbite. Un grain a été entouré pour l'étudier.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N49
Métrage	224,7
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Magnétite avec apatites, probablement high-grade. C'est un cumulat/pegm. avec AP orange interstitielle

### Description microscopique

Minéralogie : 30% magnétite, 26% apatite, 15% carbonates, 15% biotite, 10% pyrite et 4% columbite.

Informations générales : La description macroscopique est tout à fait vraie. C'est une magnétite aux grains de forme et de taille variable. Les apatites sont interstitielles, assez fines, mais bien formées. Les biotites sont aussi de taille variable, mais la plupart sont grossières, idiomorphes et au pléochroïsme important. Les carbonates sont aussi interstitielle, altérés ici, frais là.

Textures : Points triples importants sur les apatites. La magnétite chevauche la biotite.

Minéralisation : La pyrite est disséminée ou en stringer et est associée à la magnétite. La columbite est assez fine, beige/brune, montre une forme idiomorphe, mais plusieurs grains sont démembrés. Elles ont beaucoup d'inclusion d'apatite. Elles se situent en amas dans les apatites justement.

Autres : La columbite est pâle, elle n'est plus opaque. Elle est en amas dans les apatites. Il y a de beaux amas sur la bordure. Les grains sont affectés par une altération et possiblement un transport, car ils sont démembrés.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N50
Métrage	227
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Magnétite + Apatite verdâtre + phénocristaux de biotite, le tout grenue. Apatite orangée interstitielle

### Description microscopique

Minéralogie : 15% magnétite, 10% apatite, 5% pyrite, 3% columbite et 2% biotite.

Informations générales : Les carbonates sont moyens, altérés, sans texture. Les magnétites, la biotite et les apatites sont dans des chenaux peu définis, mais que l'on devine. Les magnétites ont des inclusions de carbonates et de biotite. Les apatites sont assez fines, souvent amas et sont elles-mêmes légèrement altérées par l'apatite blanche.

Textures : Texture « vache » dans le sens que la roche est blanche et les grains grossiers de magnétite lui donne une allure de bovin. Les apatites contournent certains grains de magnétite.

Minéralisation : Les pyrites sont xénomorphes et souvent allongées. Certains grains sont en pleine transformation avec la magnétite. Il y a un lien direct magnétite-pyrite. Sinon, il y a 2 générations de pyrite. Quant aux columbites, elles sont dans les amas d'apatite dans les chenaux. Elles sont idiomorphes pour la plupart et montrent une zonation externe. Elles sont brunâtres. Elles ont des inclusions d'opaques en L.R.

Autres : La columbite est en amas dans les chenaux d'apatite. Il y a des grains de pyrite qui montrent une transformation de la magnétite. Vérifier ce que sont des inclusions en L.R. dans les columbites.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N51
Métrage	231,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie massive et amas d'apatite orangée avec magnétite

### Description microscopique

Minéralogie : 81% carbonates, 10% apatite, 5% magnétite, 3% biotite et 1% pyrite.

Informations générales : Roche massive dominée par les carbonates. Très simple minéralogiquement. Les carbonates sont moyens, altérés, mais certains montrent un cœur frais. Les apatites sont arrondies et disséminées partout sur la lame. Les biotites sont idiomorphes et assez fines.

Textures : Il y a quelques gros amas d'apatite sur la lame. C'est un amalgame de grains fins aux points triples.

Minéralisation : La pyrite est xénomorphe et disséminée. Les magnétites sont grossières, hypidiomorphes, très bien conservées, sans inclusions.

Autres : Aucune minéralisation associée aux amas d'apatite (qu'il faudrait expliquer).  
Dolomie massive.



### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-N52
Métrage	232,1
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	C2S légèrement foliée avec accessoires

### Description microscopique

Minéralogie : 90% carbonates, 8% apatite (altération) et 2% pyrite.

Informations générales : Roche massive de carbonates. Très homogène. Les carbonates sont idiomorphes, de taille moyenne, équi-granulaires et montrent des textures. La seule apatite se retrouve sous forme d'altération d'apatite blanche en chenaux/veinules.

Textures : Clivages apparents et la texture équi-granulaire.

Minéralisation : La pyrite est idiomorphe, très beaux cubes. Les grains sont disséminés.

Autres : Aucune minéralisation en Nb.

## Descriptions macro- et microscopiques des échantillons de Niobec

### Forage 4341 – N180°/-31°, 115m

#### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S01
Métrage	3,8
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie foliée avec bte

#### Description microscopique

Minéralogie : 65% carbonates, 20% apatite, 10% biotite, 4% pyrochlore et 1% pyrite.

Informations générales : Roche possédant des carbonates altérés de taille moyenne comme matrice. Une légère foliation magmatique se devine par l'orientation préférentielle des apatites. Elles se retrouvent principalement en veinules. Les biotites sont légèrement altérées et ont des inclusions de carbonates, mais pas au stade de remplacement.

Textures : Les textures habituelles, points triples des apatites, peu d'information sur les carbonates altérés, biotites disséminées, pyrochlores en lien avec les apatites.

Minéralisation : Pyrite hypidiomorphe, en traces. Les pyrochlores sont quasi en totalité idiomorphes, certains montrent même une fine zonation extérieure. Ils sont fins à moyens, d'un brun/gris foncé. Certains grains ont les pointes tronquées. Principalement en présence des apatites.

Autres : Le grain entouré montre un pyrochlore zoné idiomorphe et non altéré. Aucune magnétite.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S02
Métrage	15,4
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite légèrement foliée, pas d'accessoire, un peu de bte. Il y a environ 15m de cette unité

### Description microscopique

Minéralogie : 80% carbonates, 15% apatite, 3% biotite, 1% magnétite et 1% pyrochlore.

Informations générales : Lame très homogène à dominance de carbonates. Ils sont altérés, allure « sale ». Effectivement légèrement foliée, engendrant une orientation préférentielle des apatites. Les apatites sont de taille moyenne, la plupart arrondies. La biotite est hypidiomorphe, montre un faible clivage. Quelques grains de magnétite, disséminés.

Textures : Deux particularités. La première est le corridor d'apatite avec beaucoup de vide. Les apatites sont toutefois altérées aussi au même titre que les carbonates. La seconde est qu'il y a des amas fortement altérés aux couronnes de carbonates fins non altérés. Ces amas font 0,5mm.

Minéralisation : Trois grains fins en bordure de la lame ont été observés et s'apparentent à des pyrochlores. Ils sont foncés sans être opaques, ont des contacts francs. Ils sont altérés et fracturés.

Autres :

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S03
Métrage	19,9
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie légèrement foliée. Correspond à une zone de mélange

### Description microscopique

Minéralogie : 68% carbonates, 25% apatite, 5% pyrochlore, 1% pyrite et 1% biotite.

Informations générales : Changement de carbonate. Sinon, ressemble beaucoup à S02 dans le sens que la roche est dominée par les carbonates qui sont altérés. Il y a une forte présence d'apatites arrondies ou allongées légèrement orientées par la faible foliation.

Textures : Aucune texture importante. Il n'y a pas d'amas altérés, de veinules ou de corridors. Les apatites montrent souvent des points triples.

Minéralisation : La pyrite est de forme variable. Il y a un grain parfaitement cubique aux inclusions d'apatite. Quant aux pyrochlores, ils sont foncés, xénomorphes et possèdent une auréole d'altération. Ils sont aussi regroupés. Rien à voir avec S02.

Autres :

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S04
Métrage	21,1
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Syénite altérée et bréchique

### Description microscopique

Minéralogie : 46% biotite/chlorite, 30% feldspath, 15% carbonates, 4% pyrochlore, 4% apatite et 1% pyrite.

Informations générales : Dominance de biotite/chlorite de taille et de forme variable (xéno- à idiomorphe). Elle entoure les fragments de syénite fortement altérés. À vrai dire, on dirait des carbonates altérés. Seules l'environnement et la couleur rosée aide l'identification. Les carbonates se retrouvent principalement en veines avec l'apatite. Il y a peu sinon pas de carbonates et d'apatite près des fragments de syénite.

Textures : La biotite montre des embriquements, est-ce des points triples? Sinon, la particularité est l'altération très foncée qui se voit en « patches ». De la minéralisation s'y retrouve

Minéralisation : La pyrite est quasi idiomorphe où des pseudocubes sont visibles. Quant aux pyrochlores, ils se retrouvent autant dans la biotite que dans les fragments de feldspaths. Ils sont en amas, assez fins et ont des parois arrondies. Ils ont souvent une biréfringence élevée, une caractéristique peu commune. Il n'y en a pas près des carbonates, ni de l'apatite.

Autres : Vérifier si ce sont des pyrochlores, car biréfringence importante, et comparer avec les roches aux alentours pour voir s'ils ont été apportés (localisés) ou pas.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S05
Métrage	27,1
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie foliée

### Description microscopique

Minéralogie : 62% carbonates, 25% apatite, 10% magnétite/pyrochlore, 2% pyrite et 1% biotite.

Informations générales : Environnement habituel dans ce secteur, carbonates altérés de taille moyenne, légère foliation, plusieurs veinules d'apatite. Fait important, le secteur le plus altéré est formé de plus fines apatites qui montrent elles aussi une altération. C'est dans cette portion que les opaques, très fins, sont présents. L'apatite est blanche.

Textures : Points triples des apatites, veinules et corridors. Relation entre les fins opaques et l'apatite très prononcée.

Minéralisation : Pyrite en stringers suivant l'apatite et la foliation. Certains grains disséminés sont idiomorphes. Les pyrochlores (si ce n'est pas des magnétites) sont très foncés, voir opaques. Ils sont hypidio- à idiomorphes. Certains ont les pointes tronquées fortifiant l'idée de pyrochlores.

Autres : Très difficile de valider la présence de pyrochlore ou de magnétite. Ils sont opaques et montrent que de fines inclusions. D'autant plus que les grains sont très fins dans les apatites, rendant l'identification encore plus dure.

La cathodoluminescence a montré que ça semblait être des pyrochlores.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S06
Métrage	31,6
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie foliée pareille que S05

### Description microscopique

Minéralogie : 63% carbonates, 25% apatite, 10% magnétite/pyrochlore et 2% pyrite.

Informations générales : Se référer à S05. Identique en macroscopique et en microscopique. Quelques différences, voir « Autres ».

Textures : Apatites très fines, équigranulaires dans des veinules. Il y a beaucoup de vide. Probablement des grains arrachés.

Minéralisation : Difficile de séparer les magnétites des pyrochlores.

Autres : Comme S05, sauf pour trois observations : il n'y a pas de secteur plus altéré et donc les apatites ne sont pas affectées et il y a beaucoup de vide, notamment dans les veinules d'apatite. Il n'y a pas d'amas d'opakes, ce qui suggère un lien avec l'altération.

La cathodoluminescence a montré que des opakes aux inclusions oranges, caractère typique des pyrochlores. Il ne semble donc pas y avoir de magnétite.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S07
Métrage	41,2
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Contact syénite altérée et dolomie massive et foliée

### Description microscopique

Lame mince obtenue plus tard compte tenu d'un problème lors de la confection. La description pétrographique s'est donc effectuée plus tard et n'a pas été retrouvée.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S08
Métrage	47,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite massive bte et mag

### Description microscopique

Minéralogie : 69% carbonates, 15% biotite, 15% apatite et 1% pyrochlore.

Informations générales : Roche dominée par les carbonates moyens à grossiers, sans macles et clivages. La roche n'est pas foliée. Les apatites sont arrondies et allongées et disposées aléatoirement dans la roche. La biotite est fine à grossière et montre des pourtours chloritisés. De plus, ils ont des ouvertures emplies de carbonates non altérés. N'a pas de magnétite.

Textures : Rien à signaler mis à part le remplissage des biotites par des carbonates.

Minéralisation : Un minuscule grain cubique de pyrite. Certains semi-opaques semblent être des pyrochlores et non pas des magnétites. Ils sont brun foncés, fins et xénomorphes.

Autres : Se serait intéressant d'identifier correctement les petits grains foncés. La grosseur et la quantité de biotite est aussi intéressante.



### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S09
Métrage	55,4
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite foliée avec accessoires rosés

### Description microscopique

Minéralogie : 63% carbonates, 15% magnétite, 15% apatite, 5% pyrite et 2% biotite.

Informations générales : Carbonates altérés d'allure équigranulaire. Légère foliation qui engendre une orientation préférentielle des apatites. Ces dites apatites sont fines à grossières et sont arrondies à allongées. Un corridor un peu plus riche en apatite et en magnétite permet de voir plus facilement les points triples. Les magnétites sont xénomorphes, souvent éclatés. La biotite montre un début de chloritisation et un remplacement en carbonates.

Textures : Mis à part le corridor d'apatite fraîche, il y a quelques veines de calcite perpendiculaires aux grains montrant des clivages. Les points triples sont bien définis. Les plus grosses magnétites montrent en L.P. un quadrillage.

Minéralisation : La pyrite est xénomorphe, fine et disséminée. Aucune minéralisation en Nb n'a été observée.

Autres :

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S10
Métrage	60,2
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Contact calcite foliée / fragments riches en ap + bte + pyro. Ponctuel, moins commun

### Description microscopique

#### Minéralogie :

*Portion carbonatée :* 63% carbonates, 15% magnétite, 15% apatite, 5% biotite et 2% pyrite.

*Portion fragments :* 50% apatite, 25% carbonates, 15% biotite, 8% pyrochlore et 2% pyrite.

Informations générales : Lame divisée en deux portions distinctes. La première, celle du centre, est une unité riche en carbonates altérés de taille moyenne à grossière. Elle est légèrement foliée, les apatites suivent la même direction. L'altération est très forte affectant ainsi les biotites et les magnétites qui ont des inclusions de carbonates. Les apatites ne sont que fracturées.

Changement drastique pour la portion à fragments. Dominée par les apatites aux bordures très franches et aux points triples très distincts, la quantité de biotite est élevée. Les biotites sont autant altérées avec un remplacement en carbonates. Il n'y a plus de magnétite, mais seulement de la pyrite.

Textures : Même caractère que d'habitude dans la zone carbonatée. Les apatites montrent des points triples et les magnétites sont fortement éclatées. L'altération est tout aussi présente dans les biotites où le remplacement en carbonates a débuté en plus d'une chloritisation sur les bordures.

À l'inverse des lames habituelles, c'est les carbonates qui se retrouvent désormais dans une matrice d'apatite. Points triples très descriptifs. Il y aussi des amas de carbonates, assez grossiers, qui semblent être des reliques, un peu partout. Ils montrent des pseudo-clivages.

Minéralisation : Aucune minéralisation en Nb dans la zone du centre. Seulement 2% de pyrite xénomorphe disséminé.

Minéralisation très importante en Nb. Les pyrochlores sont très fins, mais idiomorphes. Ils se retrouvent en amas. Deux types observés, mais qui, à première vue, ne semblent pas coexistés. Les amas semblent distinctifs. Le premier type est très foncé, quasi opaque. Le second est le brun/beige foncé habituellement observé.

Autres : Possiblement l'une des lames les plus riches en pyrochlores. Semble y avoir deux types, l'un très foncé, quasi opaque. Le second est le brun/beige foncé habituellement observé.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S11
Métrage	64,9
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite foliée avec pyrochlores grossiers

### Description microscopique

#### Minéralogie :

Portion carbonatée : 80% carbonates, 20% apatite.

Corridor : 55% apatite, 20% carbonates, 15% pyrochlore, 5% magnétite et 5% pyrite.

Informations générales : La portion pauvre en accessoires est dominée par les carbonates toujours altérés. Les apatites sont disséminées, arrondies. Peu d'information sur cette portion. Quelques grains idiomorphes de pyrite. Fines veinules tardives de carbonates.

La seconde portion est riche en apatites en amas, aux bordures franches. Les carbonates sont en interstices. La lame parle d'elle-même.

Textures : Points triples très évidents dans la portion riche en apatite. Relation Ap/pyro visible.

Minéralisation : La pyrite est hypidio- à idiomorphe et ne possède pas d'inclusion. Il semble, tout comme S10, y avoir deux types de pyrochlores. Ils sont généralement très fins, mais bien formés, qu'importe le type. Il y a sans équivoque une relation apatite/pyrochlore. Le type très foncé comme la magnétite (ce qui explique la possibilité de 5% magnétite) est difficile à décrire et est prédominant ici. Le type brunâtre est moins présent et montre des grains plus grossiers, comme celui entouré. Celui entouré montre une biréfringence très élevée. Est-ce vraiment un pyrochlore?

Autres : Ressemble beaucoup à S10 du point de vue où il y a une portion pauvre en accessoires et que l'autre est riche en pyrochlores sous forme de deux types, l'un très foncé, à confondre avec la magnétite et d'un brun foncé.

À confirmer si les brunâtre sont des pyrochlores. Celui entouré montre une biréfringence élevée. Dominance du type foncé quasi opaque.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S12
Métrage	68,9
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite massive, peu d'accessoires. Couleur mauve (calcite)

### Description microscopique

Minéralogie : 85% carbonates, 10% apatite, 4% pyrite et 1% magnétite/pyrochlore.

Informations générales : Roche effectivement massive à dominance de carbonates. La couleur mauve en macroscopique ne se reflète pas en lames minces. Les carbonates sont de forme irrégulière et ont les arrêtes arrondies. Les apatites sont principalement sous forme de veinules, seulement quelques grains sont libres dans la matrice. Elles sont arrondies.

Textures : L'extinction roulante est dominante. Il y a relation entre les opaques (magnétite ou pyrochlore) et l'apatite. Ils se retrouvent à proximité.

Minéralisation : La pyrite est xénomorphe en stringer. Elle n'a pas d'inclusion. Les quelques grains d'opaques observés ne semblent pas magnétiques. Ils s'approchent d'une forme rectangulaire. Légèrement brun.

Autres : Peu d'accessoire hormis la pyrite et les quelques (3) grains opaques.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S13
Métrage	78,6
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie foliée avec veinules ap rouges, bte + pyro. Zone à fragments après syénite

### Description microscopique

Minéralogie : 65% carbonates, 20% apatite, 10% pyrochlore et 5% pyrite.

Informations générales : Carbonatite fortement foliée montrant des veines d'apatite très concentrées suivant la foliation. Les carbonates sont très altérés et les apatites sont fines.

Textures : Une veine de carbonates idiomorphes recoupe perpendiculairement les veinules d'apatite. La foliation est la principale texture.

Minéralisation : La pyrite est grossière et xénomorphe. Elle est en stringers suivant la foliation. Les pyrochlores se retrouvent sous deux couleurs : très noir ou brun foncé. Leur taille est variable. Il y en a un très grossier (~5mm). Ils sont hypidio- à idiomorphes. Il semble y avoir plus grains de couleur brun dans la matrice carbonatée et peu de noirs.

Autres : Lame très riche en pyrochlores. Se pourrait-il que les pyrochlores noirs sont issus des veinules d'apatite et que ceux bruns foncés sont principalement liés aux carbonates?

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S14
Métrage	83,1
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie foliée avec ++ accessoires. Ap rouge et blanche en veines. Vérifier les fragments: bte? Syénite altérée?

### Description microscopique

Minéralogie : 70% carbonates, 20% apatite, 8% pyrite et 2% pyrochlore.

Informations générales : Ressemble beaucoup aux autres roches dans les environnements adjacents dans le sens où il y a dominance de carbonates et peu d'accessoires. C'est des carbonates massifs et altérés. Toutefois, dans la zone foliée, les accessoires (apatite, pyrite et pyrochlores) sont nombreux. Il n'y a pas de biotite et peu de magnétite.

Textures : Veines de carbonates dans la zone massive et veines d'apatite importantes dans la zone foliée. Les veines sont blanches Points triples caractéristiques encore observés.

Minéralisation : La pyrite est xénomorphe, assez grossière et ne montre pas d'inclusions. La magnétite se retrouve en amas comme le pyrochlore. Quant aux pyrochlores, ils sont fins, hypidio- à idiomorphes et se retrouvent possiblement sous deux types. Ils sont identiques à ceux retrouvés dans les lames précédentes.

Autres : Il est nécessaire d'identifier s'il y a bien 2 types de pyrochlores, car semble être de la magnétite. Peut-être y a-t-il les 3 aussi.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S15
Métrage	88,6
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite massive avec ++ bte. Retour à calcite jusqu'à la fin. Début de l'unité est plus hétérogène (secteur dolomitique)

### Description microscopique

Minéralogie : 51% carbonates, 20% apatite, 20% biotite, 5% pyrite, 2% magnétite et 2% pyrochlore.

Informations générales : Roche massive, homogène et légèrement magnétique. Elle est dominée par les carbonates et de très grossiers grains de biotite. Ces grains sont très foncés et altérés (remplissage, aucun clivage), montrent un faible pléochroïsme. Les apatites sont arrondies, certaines sont très grossières (grosses bulles) et sont disséminées.

Textures : Dans la portion plus riche en accessoires se retrouve une veine de carbonates de 0,5mm aux clivages bien définis. Très près se trouve des veinules d'apatite où une forte altération perçue comme de fines barres noires disposées aléatoirement sont observées. Les biotites y sont aussi plus affectées, mais c'est aussi la seule place où se retrouve la minéralisation.

Minéralisation : Pyrite xénomorphe, assez grossière, disséminée. Les grains de pyrochlore ont des bordures très franches, sont fortement fracturés et montrent des inclusions de carbonates. Ils sont toutefois plus fins (mais aux même caractéristiques) lorsqu'ils sont dans les veinules d'apatite.

Autres :

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S16
Métrage	92,7
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite massive bleutée avec ~5% mag et des fragments de syénite

### Description microscopique

Minéralogie : 73% carbonates, 10% biotite, 10% magnétite, 5% pyrite et 2% pyrochlore.

Informations générales : Roche très fraîche, peu altérée. Il y a effectivement des endroits où les carbonates sont grossiers, bien cristallisés et montrent des clivages. L'altération, lorsque présente, est moins forte que « d'habitude ». La biotite n'a pas de beaux clivages, mais montre un pléochroïsme. Les apatites sont hypidiomorphes et ont souvent des points triples.

Textures : Des amas d'apatite sont présents et une extinction roulante les affecte. Sinon, les barres noires sont visibles, possiblement une altération. Il semble y avoir une relation entre les carbonates altérés et la présence de biotite.

Minéralisation : La pyrite est hypidiomorphe et n'a pas d'inclusion. La magnétite, aussi hypidio, contient des inclusions de carbonates. Les pyrochlores sont moyens à grossiers, bien formés aux bordures franches. Ils sont brun foncé, le type généralement observé. Ils sont distribués aléatoirement.

Autres : Définir le type d'altération qu'est les barres noires.



### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S17
Métrage	94,2
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Brèche de syénite. Fragments (mm=micas à cm=rose) frais dans matrice altérée. Environ 10m de brèche

### Description microscopique

Minéralogie : 42% biotite/chlorite, 30% carbonates, 15% feldspaths, 5% zircon, 5% apatite, 2% pyrochlore et 1% pyrite.

Informations générales : Les carbonates sont équi-granulaires, non altérés, très bien formés et montrent des clivages bien apparents. L'apatite est conjointe aux carbonates, est arrondie et disséminée. Les micas sont essentiellement identiques à ceux décrits dans S04 dans le sens où ils sont de la même forme et sensiblement de la même taille, s'embriquent. Ils sont toutefois affectés par des points noirs auréolés (zircons).

Textures : La principale texture est la coronitique où les biotites entourent les fragments de feldspaths. Plusieurs biotites montrent des zonations, une caractéristique que je ne connaissais pas de ce minéral. Les fragments de feldspaths ne sont pas pareils que dans S04, ils ont une allure plus sale et sont moins rosés.

Minéralisation : Les grains sont libres dans les carbonates et ne semblent pas être rattachés à la biotite, une caractéristique très différente de S04. Ils sont difficile à différencier des zircons d'autant plus qu'il y en a pas tant que ça. Ils sont brun foncé, plus que ceux observés dans S04.

Autres : Environnement très différent de S04. Trois particularités encore : les biotites zonées, les pyrochlores plus foncés (avec les carbonates, pas les micas) et les minéraux aux auréoles foncées dans les biotites, probablement des zircons.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S18
Métrage	105,7
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Syénite altérée avec ++ bte. Veines de calcite. C'est la bordure supérieure de la zone de brèche. S'observe sur ~15m

### Description microscopique

Minéralogie : 60% biotite, 30% feldspaths et 10% carbonates.

Informations générales : Les feldspaths sont frais et montrent des macles.

Textures : -----

Minéralisation : Aucune minéralisation observée.

Autres : Moins ordonné que S17. La texture coronitique n'est plus, pas de minéralisation visible.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S19
Métrage	112,3
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite massive. Ap blanche avec bte + pyri. Supposé être des pyrochlores, testés en macro

### Description microscopique

Minéralogie : 67% carbonates, 20% apatite, 10% biotite, 2% pyrite et 1% magnétite/pyrochlore.

Informations générales : Roche massive. Les carbonates sont grossiers et relativement bien formés, quoiqu'altérés. Les apatites sont encore une fois arrondies, disséminées ou en amas. Les biotites sont de taille variable, très foncées et montrent des remplacements en carbonates non altérés.

Textures : Les points triples sont observés. Les apatites dans la matrice sont équi-granulaires, mais plus fines dans les amas.

Minéralisation : Pyrite xénomorphe disséminée. Les autres opaques sont de taille moyenne, hypidiomorphes et possèdent des inclusions en carbonates. Pyrochlore ou magnétite.

Autres : En L.N., les opaques ressemblent plutôt à de la magnétite, car les grains sont noirs, de forme variable et qu'ils sont plus détritiques que les pyrochlores généralement observés. Or, les tests macroscopiques préliminaires sur les grains suggéraient que c'était des pyrochlores.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S20
Métrage	115,5
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Calcite massive minéralisé. Ressemble à S19, mais probablement plus riche.

### Description microscopique

Minéralogie : 70% carbonates, 15% apatite, 6% pyrochlore, 5% inconnu (isotrope) et 4% pyrite.

Informations générales : Carbonates massifs avec un amas d'apatite au centre et une veinule sur le bord de la lame. Altération pervasive sur les carbonates, sauf dans un secteur où ils semblent plus récents et que des macles sont aussi observées. La pyrite et les pyrochlores sont disséminées.

Textures : Il y a une zone d'altération où les fameuses barres sont présentes. Les carbonates sont alors en baguettes disposées aléatoirement.

Minéralisation : Les pyrites sont de taille et de forme variable, de fine à grossière et d'arrondie à cubique. Les pyrochlores sont aussi de taille/forme variable. Ils sont toutefois bien formés en général et sont à majorité d'une couleur brune foncé. Certains grains sont noirs, peut-être est-ce de la magnétite.

Autres : Il y a une portion de carbonates massifs non altérés et aux macles apparentes. Il y a aussi un amas d'apatites fines avec un second minéral isotrope transparent qui ressemble aux apatites.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-S21
Métrage	27,9
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Dolomie. Pyrochlores très fins dans un amas riche, mais très local

### Description microscopique

Minéralogie : 70% carbonates, 20% apatite, 10% pyrochlore et traces de pyrite.

Informations générales : Roche très simple minéralogiquement et en textures. Dominée par les carbonates altérés, mais assez grossiers. Plusieurs nervures (petits corridors) d'apatite. Aucun artifice, aucun autre minéral accessoire.

Textures : Rien à signaler.

Minéralisation : Les pyrochlores sont opaques et pourraient être confondus avec de la magnétite. Ils possèdent des inclusions carbonatés. Ils sont moyens à grossiers, hypidiomorphes.

Autres : Une des lames les plus riches en pyrochlore et la corrélation apatite / pyrochlore n'est pas observée. La minéralisation est pervasive dans la roche.

### Identification de l'échantillon

Nom de l'échantillon	JT-15-4321
Métrage	
Date de collecte	29 mai 2015
Informations lors de la collecte	Donné par G. Ratthé

### Description microscopique

Minéralogie : 44% carbonates, 30% magnétite, 15% apatite, 5% inconnu, 2% baryte (?) 2% biotite et 1% pyrite.

Informations générales : La première moitié de la lame est composée de carbonates, d'apatite et de traces de magnétite. Les apatites sont fines, arrondies et en amas. Les magnétites sont grossières, xénomorphes. Les carbonates, au premier visuel, n'ont rien de discriminant, mais la vue en 10x montre des grains idiomorphes très bien formés. Il y en a de très grossiers, mais la majorité sont très fins.

La seconde portion est dominée par la magnétite. Les grains sont xénomorphes et ont des inclusions de carbonates. La caractéristique des carbonates est toujours observée, mais moins présente. Il y a aussi des « courants » ondulés d'un minéral très fin aux interstices des magnétites. La biotite se retrouve seulement dans cette portion.

Textures : Grains équigranulaires idiomorphes de carbonates. Apatites en amas, points triples visibles. Ondulations interstitielle d'un minéral d'altération.

Minéralisation : Aucune minéralisation en Nb. Pyrite disséminée xénomorphe.

Autres : Aucune minéralisation. Deux points toutefois importants : à 10x, l'on observe que les carbonates sont idiomorphes, très bien formés et que les apatites sont tout aussi bien formées dans des veines, ce qui suggère que c'est de la baryte.

## ANNEXE 8

Cette annexe n'est qu'un préambule des observations et des analyses obtenues à la cathodoluminescence, au MEB, à la microsonde, au MLA (*Mineral Liberation Analyser*) et au LA-ICP-MS. Les données complémentaires se retrouvent sur CD-ROM disponible à la Bibliothèque Paul-Émile-Boulet de l'UQAC ou par demande au courriel de l'auteur ([jonathan.tremblay11@uqac.ca](mailto:jonathan.tremblay11@uqac.ca)).

Le CD-ROM comprend ainsi :

- 285 photos acquises en cathodoluminescence (UQAC);
- Photos en électrons secondaires et en électrons rétrodiffusés au MEB ainsi que les analyses semi-quantitatives correspondantes (7 séances, CURAL, UQAC);
- Données à la microsonde (McGill). Le nom des échantillons correspond au numéro de la lame, le minéral attendu (pcl ou clb), ainsi qu'une description de l'analyse, le cas échéant (p.ex. core : cœur ou rim : bordure);
- Données LA-ICP-MS brutes et traitées avec Iolite, comprenant les standards. Les analyses ont été pratiquées avec un laser UP-213 (New Wave Research) couplé à un ICP-MS de marque Agilent 7700x. Le standard interne pour le pyrochlore est  $^{44}\text{Ca}$  et celui pour la columbite-(Fe) est le  $^{57}\text{Fe}$ . Diamètre du faisceau de 10  $\mu\text{m}$  et pulse de 20 Hz (UQAC);
- Données MLA effectuées par COREM dans le but premier de percevoir les types de pyrochlore présents dans les échantillons recueillis.